KRALİYET AKADEMİSİ
BİLİM KİTABI ÖDÜLÜ
2015 FİNALİSTİ

•

YILIN EN İYİ
BİLİM KİTABI
Amazon

Kuantum Sınırında Yaşam

Yaklaşan Kuantum Biyolojisi Çağı

Jim Al-Khalili
ve
Johnjoe McFadden

domingo

6. BASKI

domingo

KUANTUM SINIRINDA YAŞAM
JIM AL-KHALILI VE JOHNJOE McFADDEN

Kitabın orijinali ilk kez İngilizce olarak "Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology" ismiyle yayımlanmıştır.
© 2014 Jim Al-Khalili ve Johnjoe McFadden

Bu kitabın Türkçe yayın hakları Anatolialit TelifAjansı aracılığıyla alınmıştır.

Türkçe yayın hakları:
© 2016 Bkz Yayıncılık Ticaret ve Sanayi Ltd. Şti.
Domingo, Bkz Yayıncılık markasıdır.
Sertifika No: 12746

Çeviri: Şiirsel Taş
Editör: Çağrı Yalgın
Sayfa ve Kapak Uyarlama: Bahadır Erşık
İllüstrasyonlar: HL Studios
Özgün Kapak Tasarımı: R.Shailer/TW

ISBN: 978 605 4729 79 1

I. Baskı: Eylül 2016
VI. Baskı: Kasım 2018
Elma Basım Yayın ve İletişim Hizm. San. Tic. A.Ş.
Halkalı Cad No:164 B-4 Blok 34395 Sefaköy
K.Çekmece İstanbul
Tel: (212) 697 30 30 Sertifika No: 12058

Tüm hakları saklıdır. Bu kitabın tümünün veya içeriğinin herhangi bir bölümünün yayıncının yazılı izni olmadan, fotokopi yöntemi dahil, elektronik ya da mekanik herhangi bir yolla çoğaltılması yasaktır.

Bkz Yayıncılık Ticaret ve Sanayi Ltd. Şti.
Şahkulu Mah. Büyük Hendek Cad.
Brot Apt. No: 4 D: 10 Beyoğlu İstanbul
Tel: (212) 245 08 39
e-posta: domingo@domingo.com.tr

www.domingo.com.tr

Kuantum Sınırında Yaşam

Jim Al-Khalili
ve
Johnjoe McFadden

Çeviri: Şiirsel Taş

domingo

Profesör Jim Al-Khalili, OBE akademisyen, yazar ve radyo-televizyon sunucusudur. Kuantum mekaniği alanında eğitim verdiği ve araştırmalarını yürüttüğü Surrey Üniversitesi'nde çalışan, önde gelen bir kuramsal fizikçidir. *Paradoks: Bilimin En Büyük Dokuz Bilmecesi*, *Pathfinders: The Golden Age of Arabic Science* ve *Quantum: A Guide For the Perplexed* gibi popüler bilim kitaplarıyla tanınmaktadır. Televizyon ve radyo kanallarında yayınlanan belgesellerde sunuculuk yapmıştır.

Profesör Johnjoe McFadden, Surrey Üniversitesi Moleküler Genetik bölümünde profesördür. Tüberkülozun moleküler ve sistem biyolojisi alanlarında önde gelen akademik kitapların editörlüğünü yapmıştır. On yılı aşkın süredir tüberküloz ve menenjit üzerinde çalışmakta olan McFadden, menenjitte ilk başarılı moleküler testi geliştirerek İngiltere'nin bilimler akademisi olan Royal Society'nin Wolfson Araştırma Ödülü'nü almıştır. *Quantum Evolution* (Kuantum Evrimi) kitabının yazarı, *Human Nature: Fact and Fiction* (İnsanın Doğası: Gerçek ve Kurmaca) kitabının editörlerindendir. *Guardian*'da genetiği değiştirilmiş ürünler, psikedelik ilaçlar ve kuantum mekaniği gibi konularda yazmaktadır.

Penny ve Ollie,
Julie, David ve Kate'e

İçindekiler

Teşekkür		ix
1	Giriş	1
2	Yaşam nedir?	25
3	Yaşamın motorları	62
4	Kuantum vuru	106
5	Nemo'nun yuvasını bulmak	142
6	Kelebek, sirkesineği ve kuantum kızılgerdan	177
7	Kuantum genler	209
8	Zihin	246
9	Yaşam nasıl başladı?	282
10	Kuantum biyolojisi: fırtınanın sınırında yaşam	308
Sonsöz: kuantum yaşam		345
Notlar		348
Dizin		359

Teşekkür

Bu kitabın yazılması üç yılımızı aldı, ancak kitabın yazarları olarak kuantum fiziğini, biyokimya ve biyolojiyi bir araya getiren bu yeni ve heyecan verici alandaki araştırmalarda yaklaşık yirmi yıldır işbirliği içindeyiz. Fakat kuantum biyolojisi gibi disiplinler arası bir alan söz konusu olduğunda, tablonun bütününü resmetmek için gereken bilimin tamamını yeterince derinlemesine ve güvenle açıklayabilecek düzeyde uzman olmak, hele de yazdığınız kitap meslekten olmayanlara yönelik, o alanda kaleme alınmış ilk kitapsa imkânsız.

Şurası kesin, ikimiz de bu kitabı tek başımıza yazamazdık; zira kitapta birimiz fizik, diğerimiz biyoloji alanındaki uzmanlığını ortaya koydu. Ayrıca çoğu kendi araştırma alanının önde gelen isimleri olan onca kişinin yardımı ve tavsiyeleri olmasaydı, ikimiz için de sonsuz gurur kaynağı olan bu kitap ortaya çıkmazdı.

Son on beş yıl içinde, kuantum mekaniği ve onun biyolojiyle olan potansiyel ilişkisi konusunda pek çok kez verimli görüş alışverişinde bulunduğumuz Paul Davies'e müteşekkiriz. Bu yeni alanda dev adımlarla ilerleyen, kendi dallarında sahip oldukları uzmanlık ve derin bilgi düzeyine haiz olmadığımız ve olamayacağımız pek çok fizikçiye, kimyacıya ve biyoloğa da şükran borçluyuz. Jennifer Brookes, Gregory Engel, Adam Godbeer, Seth Lloyd, Alexandra Olaya-Castro, Martin Plenio, Sandu Popescu, Thorsten Ritz, Gregory Scholes, Nigel Scrutton, Paul Stevenson, Luca Turin ve Vlatko

Vedral'a özellikle teşekkür ederiz. Ayrıca 2012'de Surrey'de IAS, BBSRC (Biotechnology and Biological Sciences Research Council: Biyoteknoloji ve Biyolojik Bilimler Araştırma Konseyi) ve MILES (Models and Mathematics in Life and Social Sciences: Yaşam Bilimleri ve Sosyal Bilimlerde Modeller ve Matematik) projesinin ortak sponsorluğuyla gerçekleşen "Kuantum Biyolojisi: Güncel Durum ve Fırsatlar" konulu, son derece başarılı geçen uluslararası çalıştayı neredeyse tek başına kotaran Surrey Üniversitesi İleri Araştırmalar Enstitüsü koordinatörü Mirela Dumic'e de teşekkür etmek isteriz. Bu çalıştay, dünyanın dört bir tarafından kuantum biyolojisi araştırmalarında pek çok öncü ismi bir araya getirdi –yeni yeni gelişmekte olduğu için bu alanda çalışanların sayısı henüz görece az– ve bize bu heyecan verici araştırma topluluğunun gerçekten de bir parçası olduğumuzu hissettirdi.

Kitap henüz taslak halindeyken, yukarıda adı geçen meslektaşlarımızın birçoğundan metni okuyup görüş bildirmelerini rica ettik. Martin Plenio, Jennifer Brookes, Alexandra Olaya-Castro, Gregory Scholes, Nigel Scrutton ve Luca Turin'e özellikle müteşekkiriz. Ayrıca taslağın son halinin bir kısmını ya da tamamını okuyup, kitaba inanılmaz katkısı olan sağduyulu ve yararlı yorumlarından ötürü Philip Ball, Pete Downes ve Greg Knowles'a teşekkür etmek isteriz. Ajansımız Patrick Walsh'a –o olmasaydı kitabın başarıya ulaşması da mümkün olmazdı– ve gerek bize olan inancı gerek proje karşısında duyduğu heyecandan ötürü Random House'tan Sally Gaminara'ya sonsuz teşekkürler. Kitabın yapısı ve formatına ilişkin tavsiye ve önerileriyle, kitabın başlangıçtaki o hantal halinden fersah fersah uzaktaki son şeklini almasına yardımcı olan Conville & Walsh'tan Patrick ve Carrie Plitt'e daha da büyük bir teşekkür borçluyuz. Mükemmel editörlüğünden ötürü ise Gillian Somerscales'e şükran borçluyuz.

Son olarak, gerek kendi kendimize dayattığımız gerekse yayıncının bize dayattığı teslim tarihleriyle yüz yüze kaldığımız ve verilmiş sözleri bir kenara bırakıp bilgisayar başında çalışmaya

kapandığımız dönemlerde cömert desteğini bizden esirgemeyen ailelerimize teşekkür ederiz. Kaç akşam, kaç hafta sonu, ailecek çıkılması planlanan kaç tatilde önceliği kuantum biyolojisine vermek zorunda kaldığımızı hatırlamıyoruz. Gerek kendimiz gerekse yeni bir alan olan kuantum biyolojisi adına bu yolculuğun daha yeni başlamış olduğunu umuyoruz.

Jim Al-Khalili ve Johnjoe McFadden
Ağustos 2014

1
Giriş

AVRUPA'DA BU YIL kış erken bastırdı, akşam saatlerinde insanın içine işleyen bir soğuk oluyor. Genç bir kızılgerdanın zihninin derinliklerine gömülü belli belirsiz bir amaç ve azim duygusu gitgide güçlenmekte.

Dişi kuş son birkaç haftayı normalde ihtiyacından çok daha fazla böcek, örümcek, solucan ve böğürtlen tüketerek geçirdi; yavrularının kanatlanıp yuvadan uçtuğu ağustos ayından bu yana neredeyse iki kat ağırlaştı. Bu fazladan kilonun çoğu, çıkacağı zahmetli yolculuk için ihtiyaç duyduğu yağ deposundan oluşuyor.

Bu, onun orta İsveç'te şu âna kadarki kısa ömrünü geçirdiği ve sadece birkaç ay önce ilk yavrularını yetiştirdiği alaçam ormanından uzaklara ilk göçü olacak. Neyse ki, önceki kış çok sert geçmemişti; ne de olsa bir sene önce tam bir erişkin olmadığı için bu denli uzun bir yolculuğu kaldırabilecek kadar güçlü değildi. Oysa şimdi, ebeveynlik sorumluluklarından bir sonraki bahara kadar kurtulmuş olarak sadece kendini düşünebilir; daha ılıman bir iklim arayışıyla güneye yönelerek, yaklaşan kıştan kaçmaya hazır artık.

Birkaç saat önce güneş battı. Hava kararırken geceyi geçireceği bir yere konuşlanmak yerine, bahardan beri ona ev sahipliği yapan devasa ağacın alt dallarından birinin ucuna zıplıyor. Yarıştan önce kaslarını gevşeten bir maraton koşucusu gibi vücudunu hızlı hızlı sallıyor. Turuncu göğsü ay ışığında pırıl pırıl. Birkaç metre ötede, yosun kaplı bir ağaç gövdesinin yabancı gözlerden sakladığı

yuvasını yapmak için harcadığı onca emek ve gösterdiği onca özen silik bir anıdan ibaret artık.

Ormandan ayrılmaya hazırlanan tek kuş o değil; ister dişi ister erkek olsun diğer kızılgerdanlar da, güneye doğru çıkacakları yolculuğa başlamak için en uygun gecenin bu olduğuna karar vermişler. Etrafındaki ağaçlardan, ormanda yaşayan diğer gece hayvanlarının her zamanki seslerini bastıran tiz kuş ötüşleri geliyor. Sanki kuşlar ormandan ayrılacaklarını cümle âleme duyurmak istiyor, onlar yokken bölgelerini ve boş yuvaları istila etmeye yeltenecek orman sakinlerine ikinci kez düşünmeleri için uyarı mesajı yolluyorlar. Ne de olsa bu kızılgerdanlar ilkbaharda geri dönmeyi planlıyor.

Çevik hareketlerle başını sağa sola çevirerek etrafı kolaçan edip tehlike olmadığına kanaat getiren kızılgerdan havalanıyor. Kış yaklaşırken geceler uzuyor, dolayısıyla önünde tekrar dinlenmeye fırsat bulmadan önce nereden bakarsak bakalım on saatlik uçuş var.

195°lik kerteriz açısıyla (güneyin 15° batısına) yola çıkıyor. Önümüzdeki günlerde üç aşağı beş yukarı aynı yönde uçmaya devam edecek ve hava güzelse günde üç yüz yirmi kilometre yol kat edecek. Yol boyunca nelerle karşılaşacağı ya da yolculuğun ne kadar süreceği hakkında hiçbir fikri yok. Yaşadığı alaçam ormanının etrafındaki topraklara aşina ama birkaç kilometre sonra, ay ışığının aydınlattığı göllerin, vadilerin ve kasabaların bulunduğu yabancı bir manzaranın üzerinde uçmaya başlıyor.

Son durağı Akdeniz'e yakın bir yerlerde; her ne kadar belli bir yere doğru yol almıyorsa da, uygun noktaya geldiğinde duracak ve ileriki yıllarda oraya dönebilmek için aynı yeri bulmasını kolaylaştıracak işaretleri ezberleyecek. Hatta gücü yeterse ta Kuzey Afrika kıyısına kadar uçabilir. Ama bu onun ilk göç tecrübesi ve şu anda tek önceliği kuzeyden gelen dondurucu kış soğuğundan kaçabilmek.

Üç aşağı beş yukarı aynı yönde uçan ve kimileri bu yolculuğu daha önce defalarca yapmış olan diğer kızılgerdanlara karşı kayıtsız görünüyor. Gece görüşü mükemmel ama ne bizim böyle bir yolculukta arayacağımız türden bir işaret arıyor ne de gece göç eden

pek çok kuş gibi içindeki gökyüzü haritasına danışarak, geceleyin berrak gökyüzündeki yıldızların örüntüsünü takip ediyor. Her yıl sonbaharda çıkacağı üç bin iki yüz kilometrelik göç yolculuğunu tamamlayabilme kapasitesini dikkate değer bir başka becerisine ve milyonlarca yıllık evrime borçlu.

Göç, hayvanlar âleminde olağan bir durum elbette. Sözgelimi, somonbalığı her kış kuzey Avrupa'nın nehirlerinde ve göllerinde yumurtlar; yavrularsa yumurtadan çıktıktan sonra nehir boyunca ilerleyerek açık denize, oradan da Kuzey Atlantik'e ulaşır ve burada büyüyüp olgunlaşır. Üç yıl sonra bu genç somonbalıkları, çiftleşmek için, yumurtadan çıktıkları göllere ve nehirlere döner. Yeni Dünya kral kelebekleri sonbaharda Birleşik Devletler'i bir uçtan diğer uca kat ederek, güneye doğru binlerce kilometre yol alır. Daha sonra bu kelebekler ya da onları izleyen kuşaklar (göç yolu üzerinde ürerler) kuzeye, baharda pupa haline geldikleri ağaçlara geri döner. Güney Atlantik'in Ascension Adası kıyılarında yumurtadan çıkan yeşil kaplumbağalar, yumurta kabuğu kaplı bu sahillere her üç yılda bir üremek için geri dönerken okyanusta binlerce kilometre yol kat eder. Ve bu liste böyle uzayıp gider: pek çok kuş türü, balinalar, karibu, dikenli ıstakozlar, kurbağalar, semenderler, hatta arılar; bu hayvanların hepsi en büyük kâşiflere dahi taş çıkartırcasına zor yolculuklar yapar.

Hayvanların yerküre üzerinde yolunu nasıl bulabildiği sorusu yüzyıllarca gizemini korumuştur. Ama artık çeşitli yöntemler kullandıklarını biliyoruz: kimileri gündüz güneşten, gece yıldızlardan faydalanan bir navigasyon sistemi kullanır; kimileriyse yoldaki coğrafi işaretleri ezberler; hatta bazıları *koklaya koklaya* gezegeni dolaşır. Fakat en gizemli yön bulma duyusu, Avrupa kızılgerdanında görülür: dünyanın manyetik alanının yönünü ve kuvvetini saptayabilme becerisi, yani manyetik algılama sistemi. Bu becerinin başka canlılarda da olduğunu biliyoruz ama öykümüz, Avrupa kızılgerdanının (*Erithacus rubecula*) yolunu nasıl bulduğuyla ilgili.

Kızılgerdanımızın ne kadar uzağa ve hangi yöne uçacağını bilmesini sağlayan şey, anne babasından ona aktarılan DNA'da

şifrelenmiştir. İşte kızılgerdan rotasını belirlemek için bu incelikli ve sıradışı yeteneğini –bir tür *altıncı his*– kullanır. Pek çok başka kuş ve hatta böcekler ve deniz hayvanları gibi kızılgerdan da dünyanın zayıf manyetik alanını hissederek, doğuştan gelen bir navigasyon duyusuyla bundan bir yön bilgisi çıkarabilme becerisine sahiptir; kızılgerdanda bu duyu, henüz anlaşılmamış bir kimyasal pusuladır.

Manyetik algılama bir muammadır. Sorun, dünyanın manyetik alanının çok zayıf olmasıdır; yüzeyde 30 ila 70 mikrotesla kuvvetinde olan bu manyetik alan tipik bir buzdolabı mıknatısının yüzde biri kuvvetinde olduğu halde, hassas bir dengeye sahip, hemen hemen sürtünmesiz bir pusula ibresini saptırmaya yeter. Bu da önümüze şöyle bir bulmaca getirir: Dünyanın manyetik alanının bir hayvan tarafından algılanabilmesi için, bu alanın hayvanın vücudundaki bir kimyasal tepkimeyi bir şekilde etkilemesi gerekir. Nihayetinde –biz dahil– bütün canlılar dışarıdan gelen sinyalleri bu şekilde algılar. Ancak dünyanın manyetik alanının canlı hücrelerdeki moleküllerle olan etkileşiminden açığa çıkan enerji miktarı, bir kimyasal bağı kırmak ya da kurmak için gereken enerjinin milyarda birinden bile azdır. O halde, manyetik alan kızılgerdan tarafından nasıl algılanabilir?

Bir gizem, ne denli küçük olursa olsun, hayranlık uyandırıcıdır çünkü çözümü dünyayı kavrayışımızda kökten bir değişiklik yapabilir. Örneğin; Kopernik'in on altıncı yüzyılda, Batlamyus'un Dünya merkezli Güneş Sistemi modelinin geometrisine dair nispeten önemsiz bir problem üzerine düşünüp taşınması, bütün evrenin ağırlık merkezini insanlığın ötesine kaydırmasıyla sonuçlanmıştır. Darwin'in, hayvan türlerinin coğrafi dağılımına ve adalarda yalıtılmış ispinoz ve alaycıkuş türlerinin niçin o denli özelleşmiş olduklarına ilişkin takıntısı, evrim teorisini öne sürmesine yol açmıştır. Alman fizikçi Max Planck, sıcak cisimlerin ısı yayma şeklini göz önüne alarak kara cisim ışınımının gizemini çözmüş, enerjinin "kuantum" denen öbekler halinde yol aldığını ileri sürmüş ve bu da 1900 yılında kuantum teorisinin doğumuyla sonuçlanmıştır. O

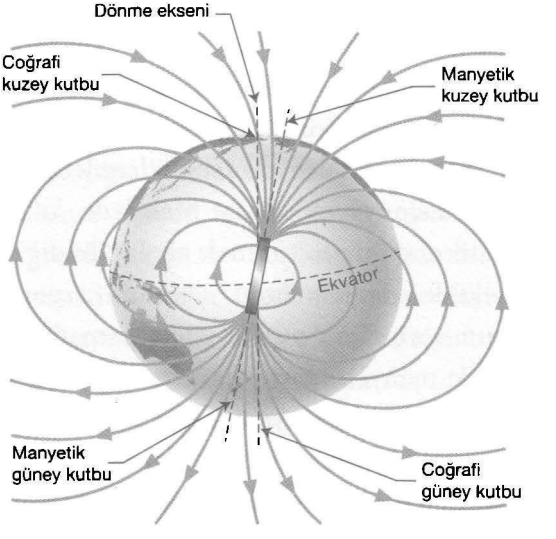
halde, kuşların yönünü nasıl tayin ettiği gizeminin çözümü biyolojide bir devrim yaratabilir mi? Ne kadar garip görünürse görünsün, bu sorunun yanıtı "evet"tir.

Fakat bu tür gizemler sahte bilimcilerin ve mistiklerin de ilgi alanına girer; Oxfordlu kimyager Peter Atkins 1976'da "manyetik alanların kimyasal tepkimeler üzerindeki etkileri"nin "uzun zamandan beri şarlatanların at koşturduğu bir alan" olduğunu söylemiştir.[1] Gerçekten de, telepatiden tutun, kadim ley hatlarına (spiritüel enerjiyle dolu olduğu iddia edilen, çeşitli arkeolojik ya da coğrafi bölgeleri birbirine bağlayan görünmez hatlar) veya parapsikolog Rupert Sheldrake'in ortaya attığı tartışmalı "morfik rezonans" kavramına kadar bütün egzotik açıklamaların ortak noktası, aynı zamanda göçmen kuşların rotalarını tayin etmede kullandığı mekanizmalar olarak ileri sürülmüş olmalarıdır. Atkins'in 1970'lerdeki çekinceleri, o dönemde yaşamış çoğu bilim insanının, hayvanların Dünya'nın manyetik alanını algılayabildiği fikrine karşı gösterdiği şüpheci tavrı yansıtıyordu ve bu yüzden de anlaşılabilirdi. Bir hayvanın bunu yapabilmesini sağlayacak herhangi bir moleküler mekanizma –en azından konvansiyonel biyokimya dünyasının sınırları içinde– o zamanlar bilinmiyordu.

Fakat Peter Atkins'in şüpheciliğini dile getirdiği sene, Frankfurt'ta yaşayan Alman ornitolog çift Wolfgang ve Roswitha Wiltschko, dünyanın önde gelen akademik dergilerinden *Science*'ta çığır açan bir makale yayımladılar. Makalede kızılgerdanların dünyanın manyetik alanını gerçekten de algılayabildiği şüpheye yer bırakmayacak şekilde kanıtlanıyordu.[2] Daha da çarpıcı olan, kuşların bu duyusunun normal bir pusula gibi çalışmadığını göstermiş olmalarıydı. Pusula manyetik kuzey ile güneyi ayırabilirken, kızılgerdan sadece kutupla ekvator arasında ayrım yapabiliyordu.

Böyle bir pusulanın nasıl çalıştığını anlamak için, bir manyetik alanın yönünü belirleyen ve alan içinde herhangi bir noktaya yerleştirilen bir pusula ibresinin gösterdiği doğrultuyu belirleyen o görünmez izleri, yani manyetik alan çizgilerini düşünmemiz gerek;

çoğumuz bu çizgileri, çubuk mıknatıs konmuş bir kâğıt üzerine demir tozu serpiştirildiğinde oluşan desenin çizgilerinden biliriz. Şimdi, dünyayı güney kutbundan çıkan alan çizgilerinin ışınsal olarak yayıldığı ve bir eğri çizip kuzey kutbundan girdiği dev bir çubuk mıknatıs olarak düşünün (bkz. şekil 1.1). Bu alan çizgileri kutuplarda neredeyse yere dikey doğrultudadır ama ekvatora yaklaştıkça gitgide gezegenin yüzeyine paralel hale gelir. O halde, manyetik alan çizgileriyle dünya yüzeyi arasındaki eğim açısını ölçen *eğim pusulası* kutup yönüyle ekvator yönünü ayırt edebilir ama alan çizgilerinin yerle yaptığı açı yerkürenin her iki ucunda da aynı olduğu için, kuzey ve güney kutuplarını birbirinden ayıramaz. Wiltschko'ların 1976 tarihli çalışması, kızılgerdanın manyetik duyusunun bir eğim pusulası gibi çalıştığını göstermişti. Ancak o dönemde, dünyanın manyetik alan açısının bir hayvanın vücudu tarafından nasıl saptanabileceğini açıklayabilecek bir mekanizma bilinmediği, hatta hayal bile edilemediği için, böylesi bir biyolojik pusulanın nasıl çalışabileceğine dair hiçbir ipucu yoktu. Sonraları bu sorunun yanıtının,



Şekil 1.1: Dünyanın manyetik alanı.

çağımızın en şaşırtıcı bilimsel kuramlarından biri olan kuantum mekaniğinin tuhaf dünyasıyla ilgili olduğu anlaşıldı.

Hayaletimsi gizli gerçek

Bilim insanları arasında bir nabız yoklaması yapmak için onlara bilim dünyasında gelmiş geçmiş en başarılı, en kapsamlı ve en önemli kuramın hangisi olduğunu sorun; alacağınız yanıt muhtemelen soruyu sorduğunuz kişinin fizik bilimleri alanında mı yoksa yaşam bilimleri alanında mı çalıştığına göre değişecektir. Biyologların çoğu, Darwin'in öne sürdüğü doğal seçilim yoluyla evrim teorisinin gelmiş geçmiş en derin fikir olduğunu düşünür. Oysa bir fizikçi büyük ihtimalle kuantum mekaniğinin bu şerefe nail olması gerektiğini iddia edecektir; ne de olsa kuantum mekaniği, fizik ve kimyanın büyük ölçüde temelini oluşturur ve bütün evreni oluşturan yapıtaşlarının eksiksiz ve çarpıcı bir resmini sunar bize. Gerçekten de, kuantum mekaniğinin açıklayıcı gücü olmasaydı, dünyanın işleyişine dair bugünkü anlayışımızın önemli bir bölümü de olmazdı.

Hemen herkes "kuantum mekaniği"ni duymuştur ve bu alanın çok zeki ve çok küçük bir azınlık tarafından anlaşılabilen, kafa karıştırıcı, zor bir alan olduğu görüşü popüler kültürün de bir parçası haline gelmiştir. Ancak gerçek şu ki, kuantum mekaniği yirminci yüzyılın başlarından beri hepimizin hayatının bir parçası olmuştur. Kuantum mekaniği bilimi, 1920'lerin ortalarında, çok çok küçük şeylerin dünyasını (mikrodünya olarak da adlandırılır), bir başka deyişle çevremizde gördüğümüz her şeyi oluşturan atomların davranışını ve o atomları meydana getiren daha da minik parçacıkların özelliklerini açıklayan matematiksel bir kuram olarak geliştirilmiştir. Sözgelimi, kuantum mekaniği, elektronların uyduğu kuralları ve atom içinde kendilerini nasıl düzenlediklerini açıklayarak, kimyanın, malzeme biliminin ve hatta elektroniğin temelini oluşturur. Dayandığı matematik kuralları bütün tuhaflığına rağmen geçen yarım asrın en önemli teknolojik ilerlemelerinin merkezinde

yer almaktadır. Elektronların madde içinde nasıl hareket ettiğini açıklayan kuantum mekaniği olmasaydı, modern elektroniğin temelini oluşturan yarı iletkenlerin davranışını asla anlayamazdık, yarı iletkenleri anlamasaydık silisyum transistoru, daha sonra mikroçipi ve modern bilgisayarları geliştiremezdik. Bu listeyi uzatabiliriz: kuantum mekaniği bilgisinde ilerleme kaydetmeseydik ne lazer olurdu ne de CD, DVD ya da blu-ray oynatıcılar; kuantum mekaniği olmasaydı akıllı telefonlarımız, uydu navigasyonu veya manyetik rezonans görüntüleme cihazları da olmazdı. Aslına bakarsanız, tahminlere göre gelişmiş ülkelerin gayri safi millî hâsılasının üçte birinden fazlasının bağlı olduğu uygulamalar, kuantum dünyasının işleyişini anlamamış olsaydık var olmayacaktı bile.

Üstelik bu sadece bir başlangıç. Lazer kullanılarak gerçekleştirilen nükleer füzyonla neredeyse sınırsız elektrik enerjisinin elde edilebildiği; yapay moleküler makinelerin mühendislik, biyokimya ve tıpta çok geniş bir yelpazede çeşitli görevler üstleneceği; kuantum bilgisayarlarıyla yapay zekâdan yararlanacağımız; hatta teleportasyonla ilgili bilimkurgu teknolojisinin bilgi iletiminde rutin kullanıma gireceği, ömrümüz vefa ederse görebileceğimiz denli yakın bir kuantum gelecek bekliyor bizi. Yirminci yüzyılın kuantum devrimi yirmi birinci yüzyılda hızını artırıyor ve hepimizin hayatını hayal bile edemeyeceğimiz şekilde değiştirecek.

Peki ama kuantum mekaniği tam olarak *nedir?* Bu kitapta irdeleyeceğimiz soruların biri bu olacak; tadımlık olarak, hepimizin hayatında önemli yer tutan gizli kuantum gerçekliğiyle ilgili birkaç örnek vererek başlayacağız.

İlk örneğimiz, kuantum dünyasının tuhaf özelliklerinden birini, tanımlayıcı diyebileceğimiz özelliğini açıklıyor: dalga-parçacık ikiliği. Kendimizin ve etrafımızdaki her şeyin atomlar, elektronlar, protonlar ve nötronlar gibi bir yığın minicik ve birbirinden farklı parçacıktan oluştuğu gerçeğine aşinayız. Işık ya da ses gibi bir enerjinin parçacıklar halinde değil, dalgalar halinde yol aldığını da biliyorsunuzdur belki. Dalgalar parçacıklı değildir, yayılarak ilerler

ve uzayda, tıpkı denizdeki dalgalar gibi, tepeleri ve çukurları olan dalgalar halinde akar. Kuantum mekaniği, yirminci yüzyılın ilk yıllarında atomaltı parçacıkların dalga gibi davranabildiğinin keşfedilmesiyle doğmuştur; buna karşılık ışık dalgaları da parçacık gibi davranabilir.

Dalga-parçacık ikiliği, üzerinde her gün düşüneceğiniz bir mesele olmasa da, çok önemli cihazların esasını oluşturur; hekimlerin ve bilim insanlarının AIDS ya da soğuk algınlığına sebep olan virüsler gibi, ışık mikroskobuyla görülemeyecek denli küçük şeyleri görüp tanımlamasına ve incelemesine olanak veren elektron mikroskobu bunlardan biridir. Elektron mikroskobunun geliştirilmesinde, elektronların dalga benzeri özellikler gösterdiğinin keşfedilmesi ilham kaynağı olmuştur. Alman bilim insanları, Max Knoll ve Ernst Ruska, elektronların dalga boyu (bir dalgada birbirini takip eden iki tepe ya da iki çukur arasındaki mesafe) görünür ışığınkinden çok daha kısa olduğuna göre, elektron görüntülemesini esas alan bir mikroskobun, ışık mikroskobuna göre çok daha ince detayları yakalayabileceğini fark etmiştir. Çünkü üzerine düşen dalgadan daha küçük boyutlara sahip bir cisim ya da detay, o dalgayı herhangi bir biçimde etkilemeyecektir. Dalga boyu metreleri bulan okyanus dalgalarının sahildeki çakıl taşlarına çarpmasını düşünün. O dalgaları inceleyerek tek bir çakıl taşının biçimi ya da büyüklüğü hakkında hiçbir şey öğrenemezsiniz. Yoluna çıktığı dalgaların geri sekmesine ya da kırınıma uğramasına yol açan bir çakıl taşını "görebilmeniz" için çok daha kısa dalga boylarına ihtiyacınız vardır; mesela okuldaki fen bilgisi derslerinden aşina olduğumuz dalga tankı gibi bir ortamda oluşturulan dalgalara. Böylece Knoll ve Ruska 1931'de dünyanın ilk elektron mikroskobunu geliştirerek bu mikroskopla virüsleri ilk kez görüntülemiştir; Ernst Ruska bu başarısıyla, bir hayli geç de olsa, 1986 yılında (ölümünden iki yıl önce) Nobel Ödülü almıştır.

Daha da esaslı ikinci bir örnek verelim. Güneş neden parlar? Güneşin hidrojen gazını yakarak, dünya üzerinde yaşamın devamlılığını sağlayan ısıyı ve ışığı açığa çıkaran bir nükleer

füzyon reaktörü olduğunu çoğu insan biliyordur herhalde; bununla birlikte parçacıkların "duvardan geçmesine" imkân veren çarpıcı kuantum özelliği olmasaydı, güneşin parlamasının mümkün olmayacağını bilenlerin sayısı daha azdır. Güneş ve aslında evrendeki tüm yıldızlar, proton denen pozitif yüklü tek bir parçacık içeren hidrojen çekirdeklerinin birleşmesi ve bunun sonucunda açığa çıkan, bizim adına güneş ışığı dediğimiz elektromanyetik radyasyon sayesinde muazzam miktarda enerji yayabilir. İki hidrojen çekirdeğinin birleşebilmesi için birbirine çok yaklaşması gerekir; fakat iki çekirdek birbirine yaklaştıkça aralarındaki itme kuvveti de o oranda artar çünkü her ikisi de pozitif yük taşır ve "benzer" yükler birbirini iter. Aslında iki çekirdeğin kaynaşabilecek kadar birbirine yaklaşması için, parçacıkların bir tuğla duvarın atomaltı eşdeğerinden, yani görünüşte nüfuz edilemez bir enerji bariyerinden geçmesi gerekir. Klasik fiziğe*, yani Isaac Newton'un ortaya koyduğu, günlük hayattaki topların, yayların, buhar makinelerinin (hatta gezegenlerin) dünyasını gayet iyi tanımlayan hareket, mekanik ve kütleçekimi yasalarına göre böyle bir durum söz konusu bile olamaz; parçacıklar duvarların içinden geçememeli ve bu nedenle de güneş parlamamalıdır.

Ama atom çekirdekleri gibi kuantum mekaniğinin kurallarına uyan parçacıkların gizli bir hilesi vardır: Böyle bariyerlerden "kuantum tünelleme" denen bir işlem sayesinde kolayca geçebilirler. Ve bunu yapmalarına olanak tanıyan şey aslında dalga-parçacık ikiliğidir. Dalgalar, sahildeki çakıl taşları örneğinde olduğu gibi cisimlerin etrafından dolanabilir ya da komşunuzdan gelen televizyon sesini duyduğunuzda duvardan geçen ses dalgaları gibi cisimlerin içinden geçebilir. Kuşkusuz, ses dalgalarını taşıyan havanın kendisi aslında duvarın içinden geçmez. Komşunuzla aranızdaki ortak duvarı titreştiren ve odanızdaki havayı iterek televizyondan çıkan

* Kuantum mekaniği öncesi dönemde ortaya konmuş olan, özel ve genel görelilik teorileri de dahil deterministik fizik kuramlarının bütünü, geleneksel olarak klasik fizik kapsamında incelendiği için klasik olmayan kuantum mekaniğinden ayrılır.

ses dalgalarının kulağınıza kadar gelmesini sağlayan şey havadaki titreşimler, yani sesin kendisidir. Ama bir atom çekirdeği gibi davranabilseydiniz, o zaman bir hayalet gibi duvarların içinden bazen geçebilirdiniz.*

Güneşteki bir hidrojen çekirdeği de tam olarak bunu yapar: Duvarın diğer tarafında onunla birleşmek üzere hazır bekleyen eşine yeterince yaklaşabilmek için yayılarak, bir hayalet gibi enerji engelinden "sızar". Bir dahaki sefere kumsalda bir yandan güneşlenir bir yandan da kıyıya vuran dalgaları seyrederken, güneşin keyfini çıkarmanızı sağlamakla kalmayıp gezegenimizdeki yaşamı mümkün kılan kuantum parçacıklarının dalga benzeri hayaletimsi hareketleri üzerinde biraz düşünün.

Üçüncü örneğimiz de konuyla bağlantılı olmakla birlikte, kuantum dünyasının farklı ve hatta daha da garip bir yönünü sergiliyor: *süperpozisyon* [üst üste binme] adını verdiğimiz fenomen, yani parçacıkların iki –ya da yüz veya milyon tane– şeyi aynı anda yapabilmesi. Bu özellik, evrenimizin son derece karmaşık ve ilginç yapısından sorumludur. Evrenin başlangıcı olan Büyük Patlama'nın ardından uzayda sağa sola saçılmış tek bir atom türü bulunuyordu: pozitif yüklü tek bir proton ve negatif yüklü bir elektron içeren, en basit atom yapısına sahip hidrojen. Dolayısıyla bu tekdüze ortamda ne yıldızlar vardı ne gezegenler ne de canlılar tabii, çünkü gerek bizi gerekse etrafımızdaki her şeyi oluşturan yapıtaşları, sadece hidrojen değil karbon, oksijen ve demir gibi daha ağır elementleri de içermektedir. Neyse ki bu daha ağır elementler, o sırada hidrojenle dolu yıldızların fırınında pişiyordu; işte bu elementlerin oluşumunu başlatan temel madde, hidrojenin farklı bir biçimi olan döteryum, varlığını birazcık kuantum sihrine borçludur.

* Kuantum tünellemeyi, fiziksel dalgaların önlerindeki engellerden sızması şeklinde düşünmek yanlış olur; kuantum parçacığını ansızın engelin diğer tarafında bulabilme olasılığı daha ziyade soyut matematiksel dalgalara bağlıdır. Bu kitapta mümkün olduğunca kuantum fenomenlerini açıklamak için insan sezgisine uyan sezgisel benzetmelerden yararlanacağız; ancak gerçek şu ki, kuantum mekaniği bütünüyle sezgiye aykırı olduğundan, anlaşılır olmak adına durumu fazla basite indirgeme tehlikesiyle karşı karşıyayız.

Tarifin ilk aşamasını az önce açıkladık aslında; iki hidrojen çekirdeğinin protonları kuantum tünellemeyle birbirine yeterince yaklaşınca açığa çıkan enerjinin bir kısmı gezegenimizi ısıtan güneş ışığına dönüşür. Ardından bu iki protonun bağlanması gerekir ama bu kolay değildir çünkü aralarındaki kuvvet yeterince güçlü bir tutkal oluşturmaz. Bütün atom çekirdekleri iki tür parçacıktan oluşur: protonlar ve onların elektriksel açıdan nötr eşleri olan nötronlar. Eğer bir çekirdekte bunlardan biri ya da öteki çok fazlaysa, kuantum mekaniğinin kurallarına göre dengenin yeniden tahsis edilmesi için fazladan parçacıkların diğer parçacık türüne dönüşmesi gerekir; yani protonlar nötrona veya nötronlar protona dönüşür ve bu sürece beta bozunumu denir. İşte iki proton bir araya geldiğinde olan budur; iki proton aynı bileşimin içinde var olamaz, bu nedenle biri beta bozunumu ile nötrona dönüşür. Geriye kalan proton ve yeni oluşan nötron artık bağlanarak döteronu (döteryum denen ağır hidrojen izotopunun* çekirdeği) meydana getirir. Artık bundan sonrasında, hepsi de hidrojene göre daha ağır olan helyumdan (iki proton ve bir ya da iki nötron içerir) karbona, azota, oksijene ve diğerlerine varan çeşitli elementlerin karmaşık çekirdeklerini oluşturan nükleer tepkimeler gerçekleşebilir.

Kritik nokta şu ki, döteron varlığını kuantum süperpozisyon sayesinde eşzamanlı olarak iki farklı durumda bulunabilmesine borçludur. Çünkü proton ile nötron birbirine, *spin* [dönüş] biçimlerine göre ayırt edilen iki farklı şekilde yapışabilir. Bu "kuantum spin" kavramının, tenis topu gibi büyük bir cismin aşina olduğumuz dönüşünden aslında çok farklı olduğunu daha sonra göreceğiz ama şimdilik dönen parçacığa dair klasik sezgimizle devam edip döteron içindeki protonla nötronu, koreografisi titizlikle planlanmış yavaş, samimi bir vals ile daha hızlı bir swing dansının birleşimi

* Bütün kimyasal elementler izotop denen farklı biçimlerde bulunur. Bir element, atom çekirdeğindeki proton sayısıyla tanımlanır: hidrojende bir, helyumda iki vb. Fakat çekirdekteki nötron sayısı değişken olabilir. Hidrojenin üç farklı çeşidi (izotopu) vardır: Normal hidrojen atomları tek bir proton içerirken, daha ağır izotopları olan döteryum bir, trityum ise iki nötron içerir.

olarak düşünelim. 1930'ların sonlarında döterondaki bu iki parçacığın birlikte dans ederken, söz konusu iki durumdan *birinde* ya da *öbüründe* değil, aynı anda her iki durumda da –eşzamanlı olarak hem vals hem de swing yaptıkları belli belirsiz bir durum– bulunduğu ve bağlanmalarını sağlayan şeyin de bu olduğu keşfedildi.*

Bu ifadeye verilecek ilk tepki kuşkusuz şu olacaktır: "İyi de, nereden biliyoruz?" Atom çekirdekleri gözle görülemeyecek kadar küçük olduğuna göre, çekirdek kuvvetleriyle ilgili bir şeyi gözden kaçırıyor olabileceğimizi varsaymak daha makul değil mi? Hayır değil çünkü protonla nötron *ya* kuantum valsi *ya da* kuantum swing'i yapıyor olsaydı, aralarındaki nükleer "tutkal"ın onları bir arada tutacak kadar güçlü olamayacağı pek çok laboratuvar tarafından defalarca doğrulanmıştır; ancak ve ancak bu iki durum üst üste bindiğinde, yani iki gerçeklik aynı anda var olduğunda, bağlayıcı kuvvet yeterince güçlü olabilmektedir. İki gerçekliğin üst üste binmesini, iki farklı rengi, mesela mavi ile sarıyı karıştırıp, yeşil gibi birleşik bir sonuç almaya benzetebiliriz: Yeşilin iki ana bileşenden meydana geldiğini bilirsiniz ama o aslında ne biri ne de diğeridir. Ayrıca maviyle sarıyı farklı oranlarda karıştırdığınızda farklı yeşil tonları elde edersiniz. Benzer şekilde döteron da, protonla nötron daha çok bir valsle birbirine kenetlenip koreografiye azıcık da swing katıldığında bağlanır.

Yani parçacıklar eşzamanlı olarak swing ve vals yapamasaydı, evrenimiz başka hiçbir şeyin oluşmadığı bir hidrojen gazı çorbası olarak kalmaya mahkûmdu; ne parlayan yıldızlar olacaktı ne diğer elementler ne de bu sözcükleri okuyan siz. Var oluşumuzun sebebi protonların ve nötronların bu sezgiye aykırı kuantum davranışı gösterebilmesidir.

Son örneğimizle teknoloji dünyasına geri dönüyoruz. Kuantum dünyasının doğasından sadece virüsler gibi çok küçük varlıkları

* Teknik olarak döteron kararlı yapısını protonla nötronu bir arada tutan "tensör etkileşimi" denen nükleer kuvvetin bir özelliğine borçludur; bu kuvvet, proton-nötron çiftini, S-dalgası ve D-dalgası olarak adlandırılan iki açısal momentumun kuantum süperpozisyonu durumunda bulunmaya zorlar.

değil, vücudumuzun içini görmek için de yararlanabiliriz. Manyetik rezonans görüntüleme (MRG), yumuşak dokunun harikulade detaylı görüntülerini veren bir tıbbi görüntüleme yöntemidir. MRG hastalıkların tanısında, özellikle de iç organlardaki tümörlerin saptanmasında rutin olarak kullanılır. MRG ile ilgili teknik olmayan açıklamalarda, bu yöntemin kuantum dünyasının garip işleyişine bağlı olduğu gerçeği genellikle es geçilir. MRG'de, hastanın vücudundaki hidrojen atomlarının dönen çekirdeklerinin eksenini hizaya sokan büyük, güçlü mıknatıslar kullanılır. Bu atomlar radyo dalgaları bombardımanına tutulunca, hizaya girmiş çekirdekler aynı anda her iki yöne de döndükleri o tuhaf kuantum durumunda bulunmaya zorlanır. Bunun neye benzediğini gözünüzde canlandırmaya çalışmanın mânâsı yok çünkü bu olay, bizim gündelik deneyimimizin çok dışındadır! Önemli olan şu: Atom çekirdekleri başlangıçtaki –onları kuantum süperpozisyona sokan enerjiyi almadan önceki– duruma geri döndüğünde bu enerjiyi dışarı verir ve MRG tarayıcısındaki elektronik sistem, söz konusu enerjiyi yakalayıp iç organlarınızın o güzelim, detaylı görüntülerini oluşturmak için kullanır.

Eğer günün birinde kendinizi bir MRG cihazında, kulaklıkla müzik dinleyerek yatarken bulursanız, bu teknolojiyi mümkün kılan atomaltı parçacıkların sezgiye aykırı kuantum davranışı üzerinde bir an durup düşünün.

Kuantum biyolojisi

Bütün bu kuantum garipliğinin Avrupa kızılgerdanının yaptığı uzun göç yolculuğuyla ne ilgisi var? Hatırlarsanız, 1970'lerin başında Wiltschko'ların yaptığı araştırmada, kızılgerdanın manyetik duyusunun bir eğim pusulası gibi çalıştığı anlaşılmıştı. Bu olağanüstü şaşırtıcı bir bulguydu çünkü o dönemde bir biyolojik eğim pusulasının nasıl çalıştığına dair en ufak bir ipucu dahi yoktu. Ancak aynı dönemde Alman bilim insanı Klaus Schulten, serbest radikallerin bulunduğu ilgili kimyasal tepkimelerde elektronların nasıl transfer

edildiği konusuyla ilgilenmeye başladı. Serbest radikaller, atomik yörüngelerde çoğunlukla çiftler halinde bulunan elektronların tersine, dış elektron kabuğunda eşlenmemiş elektron taşıyan moleküllerdir. Spinin tuhaf kuantum özelliğini düşündüğünüzde bu durum önem kazanır çünkü elektron çiftleri birbirine zıt yönlerde döndüğünden spinler birbirini götürür ve toplam spin sıfırlanır. Fakat serbest radikallerde, eşlenmemiş elektronun spinini sıfırlayacak bir ikizi bulunmadığından, tek kalan elektronun atoma manyetik özellik kazandıran net bir spini vardır ve bu spin bir manyetik alanla aynı doğrultuda hizaya girebilir.

Schulten, *hızlı üçlü tepkimesi* adı verilen bir işlemle oluşan serbest radikal *çiftlerinin* karşılık gelen elektronlarının "kuantum dolanık" olabileceğini ileri sürdü. Birbirinden ayrılan iki elektronun hassas kuantum durumu, kitabın ilerleyen bölümlerinde anlayacağınız bazı incelikli nedenlerden ötürü, herhangi bir manyetik alana karşı son derece duyarlıdır. Schulten daha sonra, kuşların gizemli pusulasının bu tür bir kuantum dolanıklık mekanizması kullanıyor olabileceğini ileri sürdü.

Kuantum mekaniğinin herhalde en tuhaf özelliği olan kuantum dolanıklıktan şu âna kadar hiç söz etmedik. Kuantum dolanıklık, eskiden bir arada olan parçacıkların, ayrıldıktan sonra aralarında çok büyük mesafeler olsa bile, neredeyse sihirli bir biçimde her an iletişimde kalmalarını sağlar. Sözgelimi bir zamanlar yakın olup da ayrıldıktan sonra evrenin zıt uçlarında bulunacak denli birbirinden uzaklaşan parçacıklar, en azından ilkesel olarak, hâlâ bağlantıdadır. Gerçekten de, parçacık çiftlerinden birini dürttüğünüz *anda* uzaktaki eşi de zıplayacaktır.* Kuantum öncüleri, dolanıklığın, denklemlerinin doğal bir sonucu olduğunu göstermişlerdi; fakat etkileri o kadar olağanüstüydü ki, bize kara delikleri ve eğip

* Açıkçası, kuantum fizikçileri böyle basite indirgeyici bir dil kullanmaz. Daha doğru olan ifade şudur: Birbirinden uzakta bulunan dolanık iki parçacık yerel olmayan bir bağlantı gösterir çünkü ikisi de aynı kuantum durumunun parçalarıdır. Ama böyle ifade edildiğinde pek de açıklayıcı olmuyor, değil mi?

büktüğü uzay-zamanı bırakan Einstein bile alaycı bir ifadeyle "uzak mesafeden hayaletimsi etki" olarak adlandırdığı bu kavramı kabullenmeyi reddetmiştir. Kuantum dolanıklığın, telepati gibi paranormal "fenomen"lerden sorumlu olduğu şeklinde asılsız iddialarda bulunan "kuantum mistikleri"nin ilgisini çeken de uzak mesafeden hayaletimsi etkidir. Einstein konuya şüpheci yaklaşıyordu çünkü dolanıklık, onun ileri sürdüğü, uzayda ışıktan daha hızlı gidebilecek hiçbir etki ya da sinyal olamayacağına ilişkin görelilik kuramını ihlal ediyordu. Ona göre, uzaktaki parçacıklar arasında anlık hayaletimsi bağlantılar olmamalıydı. Ancak Einstein bu kez yanılıyordu: Deneysel olarak, kuantum parçacıklarının sahiden de anlık uzun menzilli bağlantıları olabileceğini biliyoruz. Ama merak ediyorsanız şu kadarını söyleyelim, telepatinin geçerliliğini sınamak için kuantum dolanıklık kavramına başvurulamaz.

Kuantum dünyasının tuhaf bir özelliği olan dolanıklığın olağan kimyasal tepkimelerde rol oynadığı fikri 1970'lerin başlarında garip karşılanıyordu. O dönemde pek çok bilim insanı, dolanık parçacıklar henüz saptanmamış olduğu için, onların gerçekten var olup olmadığından şüphe eden Einstein'ın tarafındaydı. Fakat aradan geçen yıllar içinde yapılan pek çok dâhiyane laboratuvar deneyi bu hayaletimsi bağlantıların gerçek olduğunu doğruladı. Bu konuda yapılan en ünlü çalışmaysa, 1982 yılında Paris-Sud Üniversitesi'nde, Alain Aspect öncülüğünde bir Fransız fizikçi ekibi tarafından gerçekleştirildi.

Aspect'in ekibi, dolanık polarizasyon durumunda foton çiftleri (ışık parçacıkları) oluşturdu. Işığın polarizasyonuna en fazla aşina olduğumuz örnek taktığımız polarize güneş gözlüğü olsa gerek. Her ışık fotonunun bir tür yönlülüğü, yani daha önce bahsettiğimiz spin özelliğini andıran bir polarizasyon açısı vardır.* Güneş ışığındaki fotonlar olanaklı bütün polarizasyon açılarıyla gelir ama polarize

* Ancak ışık hem bir parçacık hem de dalga olarak düşünülebileceği için polarizasyon kavramı (kuantum spinin tersine) bir ışık dalgasının salınım yaptığı yön olarak düşünüldüğünde daha kolay anlaşılabilir.

güneş gözlüğü bunları filtre ederek sadece belli bir polarizasyon açısıyla gelenlerin geçmesine izin verir. Aspect, polarizasyon yönleri farklı –diyelim ki biri yukarı, diğeri aşağı yönelmiş– olmakla kalmayıp, aynı zamanda dolanık olan foton çiftleri oluşturdu. Dans eden çiftlerimizi hatırlayacak olursanız, dolanık çiftlerden ne biri ne de diğeri iki yönden birini gösteriyordu; her ikisi de eşzamanlı olarak her iki yöne de işaret ediyordu, *ta ki ölçüm yapılana kadar.*

Ölçüm, kuantum mekaniğinin en gizemli –ve kuşkusuz en tartışmalı– yönlerinden biridir; sizin de aklınıza şu soru gelmiştir kuşkusuz: Neden gördüğümüz her şey, kuantum parçacıklarının yapabildiği bu tuhaf ve muhteşem şeyleri yapamıyor? Çünkü mikroskobik kuantum dünyasında parçacıklar, aynı anda iki şeyi birden yapmak, duvarların içinden geçmek ya da hayaletimsi bağlantılar kurmak gibi garip davranışlar gösterebilir ama sadece ve sadece biri onlara bakmıyorsa. O ya da bu şekilde gözlemlenmeye ya da ölçüm yapılmaya başlandığında, tuhaflıklarını kaybederek etrafımızda gördüğümüz klasik nesneler gibi davranmaya başlarlar. Bu durum bir başka soruyu da beraberinde getiriyor elbette: Ölçümde, kuantum davranışı klasik davranışa çevirecek kadar özel ne var?* Bu sorunun yanıtı öykümüz açısından çok önemli çünkü ölçüm, kuantum dünyası ile klasik dünya arasındaki ve kitabın adından da tahmin edebileceğiniz üzere, yaşamın da bulunduğunu iddia ettiğimiz kuantum sınırında yer alır.

Bu kitap boyunca kuantum ölçümü inceleyeceğiz; bu gizemli sürecin inceliklerinin yavaş yavaş üstesinden geleceğinizi ümit ediyoruz. Şimdilik fenomenin sadece en basit yorumunu ele alalım;

* Bir kez daha, kendimizi daha açık ifade edebilmek adına, kasıtlı olarak aşırı basitleştirmeye gidiyoruz. Bir kuantum parçacığının belirli bir özelliğini, sözgelimi konumunu ölçmek, artık onun nerede olduğuna ilişkin kafamızdaki belirsizliğin giderildiği anlamına gelir; yani bir bakıma parçacığa odaklandığımızda bulanıklık ortadan kalkar. Ancak bu, onun artık klasik bir parçacık gibi davrandığı anlamına gelmez. Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi nedeniyle artık sabit bir hızı yoktur. Gerçekten de belirli konumdaki bir parçacık o anda olası bütün yönlerde, olası bütün hızlardaki hareketin süperpozisyonu halindedir. Tıpkı kuantum spinde olduğu gibi bu özellik de sadece kuantum dünyasına ait olduğundan, ölçüm yapmak parçacığın klasik bir davranış göstermesine neden olmaz.

bir kuantum özelliği, sözgelimi polarizasyon durumu, bilimsel bir aletle ölçüldüğünde, eşzamanlı olarak farklı yönleri gösterme gibi kuantum becerilerini ânında unutmak ve tek bir yönü gösterme gibi bilinen klasik bir özelliği üstlenmek zorunda kalır. O nedenle, Aspect dolanık foton çiftinin polarizasyon durumunu, polarize mercekten geçip geçemeyeceğini gözlemleyerek ölçtüğünde, izlediği foton, eşiyle olan hayaletimsi bağlantısını ânında kaybedip tek bir polarizasyon yönünü gösteriyordu. Ve onun eşi olan foton da, ne kadar uzakta olursa olsun, ânında aynı şekilde davranıyordu; en azından kuantum mekaniği denklemleri böyle öngörüyordu ki Einstein'i huzursuz eden de buydu tabii.

Aspect ile ekibi ünlü deneylerini, laboratuvarda birbirinden metrelerce, yani aralarında, polarizasyon açısını koordine etmelerini sağlayacak, ışık hızında ilerleyen bir etkinin –ki izafiyet kuramına göre hiçbir şey ışıktan daha hızlı gidemez– söz konusu olamayacağı mesafedeki foton çiftleri üzerinde yaptılar. Buna rağmen parçacık çiftleri üzerinde yapılan ölçümler arasında bir bağıntı vardı: Bir fotonun polarizasyonu yukarı doğru olduğunda, diğerininki aşağıyı gösteriyordu. Deney 1982'den bu yana, birbirinden kilometrelerce uzakta olan parçacıklarda bile tekrarlandı ve aralarında Einstein'ın kabul edemediği o hayaletimsi bağlantının olduğu saptandı.

Schulten kuşlardaki pusulada dolanıklığın rol oynadığını ileri sürdüğünde, Aspect'in deneyini gerçekleştirmesine daha birkaç yıl vardı ve fenomen hâlen tartışmalıydı. Ayrıca bir kızılgerdanın, böylesine belirsiz bir kimyasal tepkimeyle *nasıl* olup da dünyanın manyetik alanını görebildiğine dair Schulten'in en ufak bir fikri yoktu. "Görme" lafını kullanmamızın nedeni, Wiltschko'lar tarafından keşfedilen bir başka tuhaf durumdur. Avrupa kızılgerdanı gececi bir göçmen olduğu halde, manyetik pusulasının etkinleşmesi için az da olsa ışık (görünür ışık spektrumunun mavi ucu civarında) gerekiyordu ve bu da, kuşun gözlerinin pusulanın çalışmasında önemli rolü olduğuna dair bir ipucuydu. Fakat görme işlevini bir kenara bırakacak olursak, gözlerin kuşun manyetik duyusuna katkısı

neydi? Radikal çiftler mekanizması doğru olsa da olmasa da, işin bu kısmı bütünüyle bir muammaydı.

Kuşlardaki pusulanın kuantum mekanizmasıyla çalıştığı kuramı, yirmi yıldan fazla bilimin tozlu raflarında paslanmaya terk edildi. Schulten ABD'ye geri döndü ve Urbana-Champaign'deki Illinois Üniversitesi'nde çok başarılı bir kuramsal fizikokimyacı grubu kurdu. Fakat ilginç kuramını hiç unutmadı ve hızlı üçlü tepkimesi için gereken radikal çiftlerini oluşturabilecek aday biyomolekülleri (canlı hücreler tarafından yapılan moleküller) öne süren makalesi üzerinde sürekli çalıştı. Ama incelediği moleküllerin hiçbiri tam anlamıyla uygun değildi; ya radikal çiftleri oluşturamıyordu bu moleküller ya da kuşların gözünde yoktu. Fakat Schulten 1998'de, hayvanların gözünde kriptokrom adı verilen esrarengiz bir ışık

2012 Surrey kuantum biyolojisi çalıştayının katılımcıları. *Soldan sağa:* yazarlar, Jim Al-Khalili ve Johnjoe McFadden; Vlatko Vedral, Greg Engel, Nigel Scrutton, Thorsten Ritz, Paul Davies, Jennifer Brookes ve Greg Scholes.

reseptörünün bulunduğunu okur okumaz zihninde alarm çanları çalmaya başladı çünkü kriptokromun radikal çiftleri oluşturma potansiyeline sahip bir molekül olduğu biliniyordu.

Yetenekli bir doktora öğrencisi olan Thorsten Ritz, Schulten'in grubuna katılmıştı. Ritz, Frankfurt Üniversitesi'nde lisans öğrencisiyken, Schulten'in kuş pusulasıyla ilgili bir konuşmasını dinlediğinden beri başka bir şey düşünemez olmuştu. Eline fırsat geçer geçmez Schulten'in laboratuvarındaki doktora programının üstüne atladı; başlangıçta fotosentez üzerinde çalışıyordu. Kriptokrom hikâyesi patlak verince manyetik algılama alanına kaydı ve 2000 yılında Schulten'le birlikte, kriptokromun kuş gözüne kuantum pusulası özelliğini nasıl kazandırdığını açıklayan, "Kuşlarda fotoreseptöre dayalı manyetik algılama için bir model" başlıklı makaleyi yazdı (Bu konuya altıncı bölümde daha etraflıca değineceğiz.) Dört yıl sonra Ritz, Avrupa kızılgerdanlarıyla ilgili bir çalışma yapmak için Wiltschko'lar ile bir araya geldi ve ekip, kuşların dünya üzerinde dolaşmak için kuantum dolanıklığı kullandığı kuramını destekleyen ilk deneysel kanıtları elde etti. Anlaşılan Schulten başından beri haklıydı. Birleşik Krallık'ın prestijli dergilerinden *Nature*'da 2004'te yayımlanan makale büyük bir yankı uyandırdı ve kuşların kuantum pusulası, yeni kuantum biyolojisi biliminin alameti farikası oluverdi.

Madem kuantum mekaniği normal bir şey, o halde kuantum biyolojisi bizi neden heyecanlandırsın?

Daha önce gerek güneşin merkezinde gerekse elektron mikroskopları ve MRG tarayıcıları gibi teknolojik cihazlarda gerçekleşen kuantum tünelleme ve kuantum süperpozisyondan söz etmiştik. O halde, kuantum fenomeninin biyolojide karşımıza çıkması bizi niye şaşırtsın? Ne de olsa, biyoloji bir tür uygulamalı kimyadır, kimya ise bir tür uygulamalı fizik. O zaman işin temeline indiğimizde, biz ve

diğer canlılar dahil her şey zaten fizikten ibaret değil mi? Derinlemesine bakıldığında kuantum mekaniğinin biyolojide rol oynuyor olması gerektiğini kabul eden pek çok bilim insanının savunduğu görüş gerçekten de budur ama bu rolün önemsiz olduğunda ısrar edilmektedir. Kast ettikleri şu aslında: Kuantum mekaniği atomların davranışını yönettiğine ve biyoloji de nihayetinde atomlar arası etkileşimlere dayandığına göre, kuantum dünyası kurallarının biyoloji için de en küçük ölçeklerde –ama *sadece* bu ölçeklerde– işliyor olması gerekir; dolayısıyla yaşam için önemli olan daha büyük ölçekli süreçlerde, etkisi varsa bile çok az olacaktır.

Bu görüşü savunan bilim insanları kısmen de olsa haklılar elbette. DNA ya da enzimler gibi biyomoleküller, etkileşimleri kuantum mekaniği kurallarınca işleyen proton ve elektron gibi temel parçacıklardan oluşur. Ama şu anda okuduğunuz kitap ya da oturduğunuz sandalyenin yapısı için de geçerlidir bu. Nasıl ki arabanızın ya da tost makinenizin çalışması nihayetinde elektronları, protonları ve diğer parçacıkları kontrol eden kuantum mekaniği güçlerine bağlıysa; yürüme, konuşma, yeme, uyuma, hatta düşünme biçiminiz de son kertede aynı güçlere bağlıdır. Ama genellikle bunu bilmeniz gerekmez. Araba tamircileri üniversitede kuantum mekaniği dersi görmez ve biyoloji eğitim programlarının çoğunda kuantum tünelleme, dolanıklık ya da süperpozisyon kavramlarının hiç bahsi geçmez. Çoğumuz, işin temeline baktığımızda dünyanın aşina olduğumuzdan tamamen farklı bir kurallar silsilesine göre işlediğini bilmeksizin yaşayıp gidebilir. Çok küçük ölçekler düzeyinde gerçekleşen kuantum olayları, her gün gördüğümüz ve kullandığımız araba, tost makinesi gibi şeyler açısından bir fark yaratmaz genellikle.

Peki ama neden? Futbol topu duvarın içinden geçmez; insanlar arasında hayaletimsi bağlantılar kurulmaz (asılsız telepati iddialarına rağmen) ve ne yazık ki aynı anda hem iş yerinde hem de evde bulunmanız olanaksızdır. Oysa bir futbol topunun ya da bir insanın yapısını oluşturan temel parçacıklar bunların hepsini yapabilir.

Gördüğümüz dünya ile fizikçilerin, yüzeyin altında gerçekten de var olduğunu bildiği dünya arasında neden bir fay hattı, bir sınır vardır? Bu, fizik alanındaki en derin sorunlardan biri olup daha önce sözünü ettiğimiz kuantum ölçüm fenomeniyle ilgili bir meseledir. Bir kuantum sistemi, klasik bir ölçüm cihazıyla, mesela Alain Aspect'in deneyindeki polarize mercekle etkileştiğinde, kuantum garipliğini yitirir ve klasik bir varlık gibi davranmaya başlar. Fakat etrafımızda gördüğümüz dünyanın tezahüründen fizikçilerin yaptığı ölçümler sorumlu olamaz. O halde, fizik laboratuvarının dışında kuantum davranışını yok eden işlevi yerine ne getirir?

Bu sorunun yanıtı, parçacıkların düzenlenme biçimi ve büyük (makroskobik) varlıklar içinde nasıl hareket ettiğiyle ilgilidir. Cansız, katı cisimlerin içindeki atomlar ve moleküller rastgele dağılmış halde bulunma ve kararsızca titreşme eğilimindedir; sıvılar ve gazlar içinde de ısıya bağlı olarak sürekli rastgele hareket halindedirler. Bu rastgeleleştirici faktörler –dağılma, titreşim ve hareket– parçacıkların dalga kuantum özelliklerinin çabucak yok oluvermesine neden olur. Yani parçacıkların her biri ve hepsi üzerinde "kuantum ölçüm" yapan, dolayısıyla etrafımızdaki dünyanın bize normal görünmesine neden olan şey, vücudun kuantum bileşenlerinin birleşik etkisidir. Kuantum garipliğini gözlemleyebilmek için ya sıradışı yerlere (örneğin Güneş'in içine) gitmeniz ya mikrodünyanın derinliklerine bakmanız (elektron mikroskobu gibi cihazlarla) ya da kuantum parçacıkları uygun adım yürüyecekleri şekilde hizaya sokmanız gerekir (MRG cihazının içindeyken vücudunuzdaki hidrojen çekirdeklerinin spininde böyle bir etki oluşur, mıknatıs devre dışı kaldıktan sonra çekirdeklerin spin yönelimi yeniden rastlantısal hale geldiği için kuantum uyumu bir kez daha ortadan kalkar). Kuantum mekaniği olmadan çoğu zaman gayet iyi idare edebilmemiz de yine aynı türde bir moleküler gelişigüzelliğe bağlıdır: Etrafta gördüğümüz cansız varlıkların gelişigüzel yönelimli ve sürekli hareket halinde olan moleküler iç ortamı kuantum garipliğini siler süpürür.

Çoğu zaman... ama her zaman değil. Schulten'in keşfettiği gibi, hızlı üçlü tepkimesinin hızı ancak ve ancak hassas kuantum dolanıklık özelliği işin içine karıştığında açıklanabilir. Ancak hızlı üçlü tepkimesi fazlasıyla hızlıdır ve hepsi hepsi birkaç molekülü ilgilendirir. Bu tepkimenin kuşlarda navigasyonda rol oynayabilmesi için kızılgerdan üzerinde uzun süreli bir etki gösterebilmesi gerekir. Dolayısıyla kuşlarda manyetik pusulanın kuantum dolanıklıkla ilgili olduğu iddiası, dolanıklığın topu topu birkaç parçacık içeren garip bir kimyasal tepkimede rol oynadığı iddiasından bütünüyle farklı düzeyde bir önerme olduğu için büyük şüpheyle karşılanmıştır. Canlı hücrelerin büyük bölümünün, bu garip kuantum etkilerini ölçerek ânında darmadağın etmesi beklenen moleküler ajitasyon halindeki su ve biyomoleküllerden oluştuğu düşünülüyordu. Burada "ölçüm" ile kast ettiğimiz şey, elbette ki su moleküllerinin ya da biyomoleküllerin, bizim bir cismin ağırlığını ya da sıcaklığını ölçüp kâğıt üzerinde ya da bilgisayar belleğinde, hatta sadece beynimizde bunun kaydını tutmamıza benzer bir işlem gerçekleştirmesi değil. Bir su molekülü, bir dolanık parçacık çiftiyle çarpıştığında olanlardan söz ediyoruz: Hareketi parçacığın durumundan etkileneceği için, su molekülünün çarpışmadan sonraki hareketini inceliyorsanız, çarptığı parçacığın bazı özelliklerini de anlayabilirsiniz. Bu açıdan bakıldığında, su molekülü bir "ölçüm" gerçekleştirir çünkü bundan sonraki hareketi, bunu inceleyecek biri olsun olmasın, dolanık parçacık çiftinin durumuyla ilgili bir kayıt tutar. Böylesi bir *kazara* ölçüm, dolanıklık durumunu ortadan kaldırmak için genellikle yeterlidir. O nedenle, hassas bir düzenleme gösteren kuantum dolanıklığın canlı hücrelerin sıcak, karmaşık iç ortamında varlığını koruyabileceği iddiasının çılgınlık sınırında gezen saçma bir fikir olduğu düşünülüyordu.

Gelgelelim son yıllarda bu konudaki bilgimiz (sadece kuşlarla olan bağlantısı açısından değil) çok büyük aşama kaydetti. Süperpozisyon ve tünelleme gibi kuantum fenomenlerinin, bitkilerin güneş ışığını tutmasından hücrelerimizde biyomoleküllerin oluşumuna

kadar birçok biyolojik olayda rol oynadığı saptandı. Hatta koku duyumuz ya da anne babamızdan kalıtım yoluyla aktarılan genlerimiz bile garip kuantum dünyasına bağlı olabilir. Artık dünyanın en saygın bilimsel dergilerinde kuantum biyolojisine ilişkin araştırma makaleleri düzenli olarak yayımlanıyor ve henüz bir avuç olsa da giderek artan sayıda bilim insanı, kuantum mekaniğinin yaşam fenomeninde önemsiz sayılmak şöyle dursun, bilakis son derece kritik bir rol oynadığını; yaşamın, bu garip kuantum özelliklerini kuantum dünyasıyla klasik dünya arasındaki sınırda sürdüren benzersiz bir konuma sahip olduğunu iddia ediyor.

Bu bilim insanlarının gerçekten de ancak bir avuç kadar olduğunu, Eylül 2012 tarihinde Surrey Üniversitesi'nde ev sahipliği yaptığımız ve bu alanda çalışanların çoğunun katıldığı kuantum biyolojisi çalıştayında, bütün katılımcıları küçücük bir toplantı salonuna sığdırabilmeyi başardığımızda açıkça gördük.

Fakat alan, kuantum mekaniğinin günlük biyolojik fenomenlerde oynadığı role ilişkin keşiflerin heyecanıyla hızla büyüyor. Yeni kuantum teknolojilerinin geliştirilmesine muazzam etkileri olabilecek, en heyecan verici araştırma alanlarından biri, kuantum garipliğinin sıcak, ıslak ve karmakarışık canlı bedenlerde varlığını nasıl sürdürebildiği gizeminin yeni yeni açıklığa kavuşmasıdır.

Ancak bu bulguların önemini hakkıyla anlayabilmek için öncelikle şaşırtıcı derecede basit görünen bir soru sormamız gerek: Yaşam nedir?

2
Yaşam nedir?

TÜM ZAMANLARIN en başarılı bilimsel görevlerinden biri, 20 Ağustos 1977'de Voyager 2 uzay aracı ve ardından, iki hafta sonra kardeş uzay gemisi Voyager 1 Florida semalarına havalandığında başladı. İki yıl sonra Voyager 1, varacağı ilk hedef olan Jüpiter'e ulaştı ve bu gaz devinin anafor yapan bulutlarıyla kırmızı lekesinin fotoğraflarını çektikten sonra gezegenin uydularından biri olan Ganymede'in buzla kaplı yüzeyinin üzerinden geçip, diğer uydusu Io'daki bir yanardağ patlamasına tanıklık etti. O sırada Voyager 2 farklı bir rota izleyerek, 1981 Ağustos'unda Satürn'e ulaştı ve gezegenin halkalarının, milyonlarca küçük kaya parçası ve minik uydulardan oluştuğunu gösteren hayret verici güzellikte fotoğraflarını göndermeye başladı. Fakat Voyager 1 ancak 10 yıla yakın bir süre sonra, 14 Şubat 1990'da tarihin en çarpıcı fotoğraflarından birini çekti: grenli, gri bir zemin üzerinde küçücük mavi bir nokta.

Geçen yarım asır içinde Voyager görev uçuşları ve keşif amaçlı uzay araçları sayesinde, insanlık ayda yürüdü, uzaktan Mars'ın vadilerini araştırdı, Venüs'ün kavurucu çöllerini gözlemledi, hatta Jüpiter'in atmosferinde son sürat giden bir kuyrukluyıldıza şahit oldu. Ama çoğunlukla sadece kaya bulundu... bir yığın kaya. Aslına bakılırsa, Apollo astronotlarının aydan getirdiği bir ton mineralden ya da NASA'nın Stardust görev uçuşu sırasında toplanan mikroskobik kuyrukluyıldız parçacıklarından tutun, Rosetta sondasının 2014'te bir kuyrukluyıldızla randevusuna ya da Mars yüzeyinin

Curiosity Rover tarafından analizine varana kadar, kardeş gezegenlerdeki keşif incelemelerinin büyük ölçüde kaya incelemesinden ibaret olduğunu söylemek mümkün – yığınla kaya.

Uzaydan gelen kayalar hayranlık uyandırıcı nesneler elbette; yapıları ve bileşimleri güneş sisteminin kökeni, gezegenlerin oluşumu, hatta güneşimizin geçmişinden de önceki kozmik olaylar hakkında ipuçları veriyor. Fakat jeolog olmayanlar için Mars'tan gelmiş bir kondrit (taş gibi, metalik olmayan bir meteorit türü) ile Ay'dan gelmiş bir troktolit (demir ve magnezyumdan zengin bir meteorit) arasında pek fark yoktur. Buna karşılık, güneş sistemimizde öyle bir yer var ki, kayaları ve taşları oluşturan temel bileşenlerin çeşitli biçim, işlev ve kimyalarla bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkan maddenin bir gramı dahi, evrenin bilinen her yerindeki madde çeşitliliğini aşar. Sözünü ettiğimiz yer, Voyager 1'in çektiği fotoğraftaki soluk mavi nokta, yani dünya adını verdiğimiz gezegen. Gezegenimizin yüzeyini benzersiz kılan çeşitli hammaddelerin bir araya gelerek yaşamı meydana getirmiş olması çok çarpıcıdır.

Yaşam olağanüstüdür. Avrupa kızılgerdanının şaşırtıcı manyetik algılama duyusundan söz ettik ama bu özel yetenek, onun çeşitli becerilerinden sadece bir tanesi. Kızılgerdan görebilir, koklayabilir, duyabilir, sinek yakalayabilir; yerde ya da bir ağacın dalları arasında hoplaya zıplaya gezinebilir; gökyüzüne yükselip havada yüzlerce kilometre uçabilir. Dahası, eşinin de yardımıyla, bütün o kayaları meydana getiren maddelerin aynını kullanarak kendine benzeyen yavrular üretebilir. Ve bizim kızılgerdan, bu ve bunun gibi hayret verici pek çok başka marifeti olan trilyonlarca canlı organizmadan sadece birisidir.

Hayranlık uyandıran bir diğer organizma da sizsiniz kuşkunuz. Gece gökyüzüne baktığınızda, gözünüze gelen ışık fotonları retina dokusu tarafından, optik sinirler boyunca ilerleyerek beyninizdeki sinir dokusuna ulaşan minik elektrik akımlarına dönüştürülür. Gökyüzünde göz kırpan yıldızı tecrübe etmenizi sağlayan, parlayıp sönen bir sinirsel ateşleme örüntüsü oluşturur bu akımlar.

Aynı anda, atmosferik basıncın milyarda biri kadar küçük basınç değişimleri iç kulağınızdaki tüysü hücreler tarafında kaydedilerek, rüzgârın ağaçlar arasında ıslık çaldığına dair sizi bilgilendiren işitsel sinir sinyalleri oluşturur. Burnunuza giren bir avuç molekül, özelleşmiş koku reseptörleri tarafından tutulur ve moleküllerin kimyasal kimlik bilgisi beyninize iletilirken size mevsimlerden yaz olduğunu, hanımelinin çiçek açtığını söyler. Yıldızları seyrederken, rüzgârın sesini dinlerken, havayı koklarken vücudunuzun en ufak bir hareketi bile yüzlerce kasın eşgüdümlü eylemiyle gerçekleşir.

Ancak kendi bedenimizdeki dokuların sergilediği fiziksel beceriler, ne denli olağanüstü olursa olsun, başka birçok canlının marifetleri yanında sönük kalır. Yaprak kesen karınca kendi ağırlığının otuz katını taşıyabilir ki bu sırtınızda bir araba taşımanızla eşdeğerdir. Kapan çeneli karıncanın çene hareketinin hızı sadece 0,13 milisaniye içinde saatte 0 km'den 230 km'ye çıkar; bir Formula 1 yarış arabasının aynı hıza ulaşmasıysa bunun yaklaşık kırk bin katı kadar zaman alır (beş saniye civarında). Amazon elektrikli yılanbalığı 600 voltluk ölümcül bir elektrik gerilimi üretir. Kuşlar uçabilir, balıklar yüzebilir, solucanlar toprağın içinde tünel kazabilir, maymunlar ağaçlarda sallanarak daldan dala atlayabilir. Ve daha önce de bahsettiğimiz gibi, Avrupa kızılgerdanı da dahil pek çok hayvan dünyanın manyetik alanını kullanarak, binlerce kilometrelik mesafede yolunu bulabilir. Ancak iş biyosentez yeteneğine gelince, hiçbir şey hava ve su moleküllerini (artı birkaç minerali) bir araya getirerek otları, meşe ağaçlarını, denizdeki yosunları, papatyaları, dev sekoyaları ve likenleri oluşturan yeşil çeşitlilikle boy ölçüşemez.

Bütün canlıların kendine has becerileri ve uzmanlıkları vardır; tıpkı kızılgerdanın manyetik algılama özelliği ya da kapan çeneli karıncanın çenesini hızla kapatması gibi. Ancak insandaki bir organın performansı emsalsizdir. Kafatasımızın içine hapsolmuş yumuşak, gri maddenin hesaplama gücünü aşan kapasitede bir bilgisayar yoktur gezegende ve insan bu sayede piramitleri, genel görelilik kuramını, *Kuğu Gölü*'nü, Rig Veda'yı, *Hamlet*'i, Ming porselenini ve Donald

Duck'ı yaratabilmiştir. Ve belki hepsinden daha da çarpıcı olan, insan beyninin var olduğunu *bilme* kapasitesine sahip olmasıdır.

Gelgelelim, sayısız biçim ve sonsuz çeşitlilikteki işlevleriyle bütün bu canlı madde çeşitliliğini oluşturan atomlar, Marslı kondritlerin yapısında bulunan atomlarla aşağı yukarı aynıdır.

Bu kitabın da merkezinde olan, bilimin yanıt bekleyen en önemli sorusu, kayalardaki durağan atomların ve moleküllerin nasıl olup da koşan, zıplayan, uçan, yönünü bulan, yüzen, büyüyen, seven, nefret eden, arzulayan, korkan, düşünen, gülen, ağlayan *canlı* varlıklara dönüşebildiği sorusudur. Bu olağanüstü dönüşümün dikkatimizi çekmemesinin nedeni aşinalık hissidir; ancak içinde bulunduğumuz genetik mühendisliği ve sentetik biyoloji çağında dahi, insanın tümüyle cansız maddeden canlı bir şey yapamamış olduğunu hatırlamakta fayda var. Şimdiye dek teknolojimizin, gezegenimizdeki en basit mikrop tarafından zahmetsizce yürütülen bir dönüşümü gerçekleştirmeyi başaramamış olması, yaşam için nelerin gerekli olduğuna dair bilgimizin henüz eksik olduğunu düşündürmektedir. Canlılara hayat veren ama cansız varlıklarda bulunmayan bir yaşamsal kıvılcımı gözden mi kaçırdık acaba?

Cansız olana hayat veren dirimsel bir güç, ruh ya da sihirli bir bileşen olduğunu iddia edecek değiliz. Anlatacağımız öykü bundan çok daha ilginç. Yaşam bulmacasındaki eksik parçalardan en az birinin, varlıkların aynı anda iki farklı yerde bulunabildiği, hayaletimsi bağlantılar kurabildiği ve geçilmez görünen engellerin içinden geçebildiği kuantum mekaniği dünyasında bulunduğunu gösteren yeni araştırmaları inceleyeceğiz. Görünüşe göre, yaşamın bir ayağı günlük nesnelerin klasik dünyasındayken, diğer ayağı kuantum dünyasının tuhaf ve kendine has derinliklerindedir. Savunduğumuz görüş şu: Yaşam kuantum sınırındadır.

Peki ama hayvanlar, bitkiler ve mikroplar, bugüne kadar sadece temel parçacıkların davranışını belirlediğine inandığımız doğa kanunları tarafından yönetiliyor olabilir mi gerçekten? Kuşkusuz, trilyonlarca parçacıktan yapılmış olan canlı organizmalar da tıpkı

futbol topları, arabalar ya da buharlı trenler gibi, Newton'un mekanik yasaları, termodinamik bilimi ya da benzeri klasik kuralların yeterli ölçüde tanımlaması gereken makroskobik varlıklardır. Canlı maddenin hayranlık uyandırıcı özelliklerini açıklamak için kuantum mekaniğinin gizli dünyasına neden ihtiyacımız olduğunu anlamak istiyorsak, öncelikle bilim dünyasının, yaşamı bu denli özel kılanın ne olduğunu anlamaya yönelik çabalarına kısaca göz atmamız gerek.

"Yaşamsal kuvvet"

Yaşamın merkezindeki bulmaca şudur: Bir kayayla kıyaslandığında, bir canlıyı meydana getiren madde neden bu denli farklı davranır? Antik Yunanlar, bu soruya yanıt arayan ilk insanlar arasındaydı. Dünyanın muhtemelen ilk büyük bilim insanı olan filozof Aristoteles, cansız maddenin güvenilir ve öngörülebilir olan belli bazı özelliklerini doğru tanımlamıştı: Örneğin; ateş ve buhar yükselme eğilimi gösterirken, katı cisimlerin düşme, gökcisimlerininse dünya etrafında dairesel bir yörünge çizme eğiliminde olması. Ama yaşam farklıydı: Pek çok hayvan, düşse bile aynı zamanda koşabiliyordu; bitkiler yukarı doğru büyüyor, hatta kuşlar dünyanın etrafında uçuyordu. Onları, dünyanın geri kalanından bu denli farklı kılan neydi? Yunan düşünür Sokrates'in bu soruya verdiği yanıt, öğrencisi Platon tarafından kaydedilmişti: "Bir bedenin içinde bulunup da onu canlı kılan şey nedir? Bir ruh." Aristoteles, canlıların ruhu olduğu konusunda Sokrates ile hemfikir olmakla beraber, ruhların farklı dereceleri olduğunu iddia ediyordu. En düşük derecedekiler bitkilerinkiydi, onların beslenmesini ve büyümesini sağlıyordu; bir kademe yukarıda, sahibine hissetme ve hareket kabiliyeti veren hayvan ruhları vardı ama sadece insan ruhu mantık ve akıl sunuyordu. Benzer şekilde antik Çinliler de canlılara hayat veren şeyin, içlerinden akan ve Qi ("çi" diye okunur) denen cisimsiz bir yaşamsal kuvvet olduğuna inanıyordu. Ruh kavramı sonraları belli başlı

bütün dünya dinlerine girdi ama doğası ve bedenle olan bağlantısı gizemini korudu.

Bir diğer bulmacaysa ölümlülüktü. Genelde ruhların ölümsüz olduğu inanışı hâkimdi, peki o zaman yaşam neden gelip geçiciydi? Çoğu kültürün bu soruya verdiği yanıt, hayat veren ruhun ölümle birlikte bedenden ayrıldığı şeklindeydi. Hayli yakın bir tarih olan 1907 yılında, Amerikalı hekim Duncan MacDougall, hastalarını ölmeden hemen önce ve öldükten hemen sonra tartıp ruhun ağırlığını ölçtüğünü iddia etmişti. Yaptığı deneyler sonucunda ruhun 21 gram çektiğine ikna oldu. Fakat ruhun, vade dolunca neden bedenden ayrılmak zorunda olduğu sorusu bir muamma olarak kaldı.

Modern bilimde artık yeri olmasa da ruh kavramı, en azından canlı olanla olmayanın alanlarını ayırmış, böylece bilim insanlarını, canlılarla ilgili herhangi bir incelemeyi zora koşan felsefe ve teolojinin sorularından azade kılmış, cansız varlıklarda hareketin nedenlerini araştırmalarına olanak sağlamıştır. Hareket kavramıyla ilgili çalışmaların uzun, karmaşık ve hayranlık uyandıran bir geçmişi vardır ama biz bu bölümde çok kısa bir tur atacağız. Aristoteles'in, cisimlerin dünyaya doğru, dünyadan uzağa ya da dünya etrafında hareket etme eğilimi gösterdiğini ileri süren ve bunların hepsini *doğal* hareketler olarak ele alan görüşünden bahsetmiştik. Ayrıca katı cisimlerin itilebileceğini, çekilebileceğini ve fırlatılabileceğini söyleyen Aristoteles "zorlanan" olarak tanımladığı bu hareketlerin, bir başka varlık –örneğin, fırlatan kişi– tarafından bir tür kuvvet uygulanarak başlatıldığını düşündü. Peki ama bu fırlatma hareketini ya da bir kuşun uçuşunu oluşturan şey neydi? Göründüğü kadarıyla dış kaynaklı bir sebebi yoktu. Aristoteles, cansız varlıklardan farklı olarak, canlı varlıkların hareketi kendi kendine başlatabildiğini ve bu durumda böyle bir hareketin nedeninin canlının ruhu olduğunu iddia etti.

Aristoteles'in hareketin kaynaklarıyla ilgili görüşleri ortaçağa kadar hâkimiyetini korudu; neden sonra çarpıcı bir şey oldu. Bilim

insanları (o zamanlar kendilerini doğa filozofları olarak tanımlıyorlardı) cansız nesnelerin hareketiyle ilgili kuramlarını mantık ve matematik diliyle ifade etmeye başladılar. İnsan düşüncesindeki bu olağanüstü verimli değişimden kimin sorumlu olduğu tartışılabilir; ortaçağda İbn-i Heysem ve İbn-i Sina gibi Arap ve Farisi âlimlerin kesinlikle rolü var, sonrasında bu değişim eğilimi Paris ve Oxford Üniversiteleri gibi Avrupa'nın yeni yeni filizlenen bilimsel kurumları tarafından da benimsendi. Ancak dünyayı bu şekilde tarif etme yolu ilk önemli meyvesini muhtemelen İtalya'da, Galileo'nun basit hareket kanunlarını matematiksel formüllerle kutsadığı Padova Üniversitesi'nde verdi. Galileo'nun öldüğü yıl olan 1642'de İngiltere'nin Lincolnshire bölgesinde doğan Isaac Newton, cansız varlıkların hareketlerinin kuvvetle nasıl değiştirilebileceğine dair olağanüstü derecede başarılı matematiksel tanımlamalar yaparak bu işe devam etti ve bugün Newton mekaniği olarak adlandırdığımız sistemi geliştirdi.

Newton'un kuvvetleri başlangıçta hayli gizemli kavramlardı ama bunlar sonraki yüzyıllarda *enerji* kavramıyla birlikte gitgide daha iyi tanımlanır oldu. Hareketli cisimlerin sahip olduğu enerji, çarptıkları durağan cisimlere aktarılarak onların da hareket etmesini sağlıyordu. Ancak bu kuvvetler cisimler arasında *uzaktan* da aktarılabiliyordu: Newton'un elmasını yere doğru çeken yerçekimi kuvveti ya da pusula ibresinde sapmaya yol açan manyetik kuvvetler gibi.

Galileo ile Newton'un başlattığı akıl almaz bilimsel ilerlemeler on sekizinci yüzyılda ivme kazandı; on dokuzuncu yüzyıl sona ererken *klasik fizik* olarak bildiğimiz alanın temel çatısı hemen hemen oluşmuştu. Isı ve ışık gibi diğer enerji biçimlerinin de maddenin bileşenleri olan atomlar ve moleküllerle etkileşerek sıcaklığının artmasına, ışık yaymasına veya renk değiştirmesine neden olduğu biliniyordu artık. Cisimlerin, hareketleri kütleçekimi ya da elektromanyetizma kuvvetleri tarafından kontrol edilen parçacıklardan

meydana geldiği düşünülüyordu.* Dolayısıyla madde dünyası ya da en azından madde dünyasının cansız varlıkları ikiye bölünmüştü: parçacıklardan meydana gelen gözle görülebilir madde ve bu parçacıklar arasında, boşlukta yayılan enerji dalgaları ya da kuvvet alanları halinde, o dönemde nasıl olduğu çok da iyi anlaşılamamış bir yolla etki gösteren, gözle görülemeyen kuvvetler. Peki ya canlı organizmaları oluşturan canlı madde? O neden yapılmıştı ve nasıl hareket ediyordu?

Makinelerin zaferi

Bütün canlı varlıkların bir tür doğaüstü madde ya da özgün durum sayesinde canlandığına ilişkin antik görüş, canlı ile cansız arasındaki belirgin farklılıklara hiç değilse bir tür açıklama getirmişti. Yaşam farklıydı çünkü onu harekete geçiren şey dünyevi mekanik kuvvetler değil manevi ruhtu. Ama tıpkı güneşin, ay ve yıldızların, onları iten melekler sayesinde hareket ettiği iddiası gibi bu açıklama da hiçbir zaman tatmin edici olmadı. Aslına bakılırsa, ruhların (ve meleklerin) doğası bütünüyle esrarengiz olduğu için, ortada gerçek bir açıklama falan yoktu.

On yedinci yüzyılda Fransız filozof René Descartes, radikal bir alternatif bakış açısı sundu. Descartes mekanik saatlerden ve o dönem Avrupa'sında saray halkını eğlendiren mekanik oyuncaklarla otomat bebeklerden öylesine etkilenmişti ki, bu mekanizmalardan esinlenerek bitkilerin ve insanlar da dahil hayvan bedenlerinin alışılageldik malzemelerden oluşmuş, cansız maddenin hareketini yöneten kuvvetlerin aynısına tabi olan pompalar, dişliler, pistonlar, mil dirsekleri gibi mekanik aletler tarafından yönlendirilen incelikli makineler olduğunu savunan devrimsel bir iddia ortaya atmıştı. Descartes insan aklını bu mekanistik bakış açısından muaf tutmuş, onu ölümsüz ruhtan mahrum bırakmamıştı ama en azından onun felsefesi,

* On dokuzuncu yüzyılın sonlarında İskoç fizikçi James Clerk Maxwell, elektriksel ve manyetik kuvvetlerin aynı elektromanyetik kuvvetin iki farklı yüzü olduğunu gösterdi.

yaşamı, cansız varlıklara hükmettiği anlaşılmış olan fizik kanunlarıyla açıklamaya yönelik bilimsel bir iskelet oluşturma girişimiydi.

Mekanistik biyolojik yaklaşım, Sir Isaac Newton ile hemen hemen aynı dönemde yaşamış olan ve kalbin mekanik bir pompadan başka bir şey olmadığını keşfeden hekim William Harvey tarafından devam ettirildi. Yüz yıl kadar sonra Fransız kimyager Antoine Lavoisier nefes alıp veren bir kobayın, tıpkı yeni buharlı motor teknolojisinde itici kuvvetin oluşmasını sağlayan ateş gibi oksijen tüketip karbondioksit oluşturduğunu gösterdi. Buna göre "solunum, kömürdekine çok benzeyen, çok yavaş bir yanma fenomenidir" sonucuna vardı. Descartes'ın da öngörmüş olabileceği üzere hayvanlar, o sırada endüstri devrimini bütün Avrupa'ya yaymakla meşgul kömürlü lokomotiflerden çok da farklı görünmüyordu.

Evet ama buharlı trenleri hareket ettiren kuvvetler yaşamı da harekete geçirebilir miydi? Bu soruya yanıt verebilmek için önce buharlı trenlerin tepeleri nasıl tırmandığını anlamalıyız.

Moleküler bilardo masası

Isının maddeyle etkileşimini inceleyen bilim dalına *termodinamik* denir; termodinamiğin temelini on dokuzuncu yüzyılda, cesur bir adımla madde parçacıklarını Newton'un mekanik yasaları uyarınca rastgele çarpışan çok sayıda bilardo topuymuş gibi ele alan Avusturyalı fizikçi Ludwig Boltzmann atmıştır.

Bir bilardo masası hayal edin,* masa ortasındaki hareketli istekayla ikiye bölünmüş olsun. Diyelim ki, beyaz isteka topu dahil bütün toplar, istekanın sol tarafında üçgen içine düzgünce yerleştirilmiş. Şimdi de bu top kümesine isteka topuyla çok sert vurduğunuzu düşünün, bu durumda toplar birbirleriyle çarpışarak ya da masanın sert kenarlarına veya hareketli istekaya çarpıp geri sekerek her yöne hızla hareket eder. İstekaya ne olur dersiniz: Bütün toplar

* Burada sözünü ettiğimiz oyun Amerikan bilardosudur.

solda olduğu için bu yönden gelen pek çok çarpışmanın kuvvetine maruz kalırken, masanın sağında kalan boş alandan kaynaklanan bir çarpışma olmayacaktır. Topların hareketi tamamen rastgele olduğu halde, gelişigüzel hareket eden bütün o topların etkisiyle hareket eden isteka, ortalama bir kuvvetle sağa doğru itilerek sol taraftaki oyun alanını genişletecek, boş alansa daralacaktır. Hayalimizi bir adım daha ileri götürüp, kaldıraç ve palangalardan oluşan bir düzenek sayesinde bilardo masamıza biraz iş yaptırabilir, sözgelimi istekanın sağa doğru hareketinden faydalanarak bir oyuncak treni tepeye doğru tırmandırmasını sağlayabiliriz.

Boltzmann, ısı motorlarının gerçek buharlı lokomotifleri gerçek tepelere doğru bu şekilde itebildiğini fark etmişti (o dönemin buhar çağı olduğunu hatırlayın). Buhar motorunun silindirindeki su molekülleri, isteka topunun darbe etkisiyle etrafa dağılan bilardo topları gibi davranır: Rastgele hareketleri kazanın ısısıyla daha da hızlanır, böylece moleküller birbirine ve motor pistonuna daha büyük bir enerjiyle çarparak pistonu dışarı doğru iter ve buharlı trenin millerini, dişlilerini, zincirlerini ve tekerlerini harekete geçirerek yönlendirilmiş bir hareket sağlar. Boltzman'ın yaşadığı dönemin üzerinden yüz yılı aşkın bir süre geçmiş olsa da benzinle çalışan arabanız da aynı ilkeler doğrultusunda hareket eder; tek fark buhar yerine petrol yanma ürünlerinin açığa çıkmasıdır.

Termodinamik biliminin çarpıcı bir yönü, aslında her şeyin bu kadardan ibaret olmasıdır. Şimdiye dek yapılmış bütün ısı motorlarının kurallı hareketini sağlayan, trilyonlarca atom ve molekülün gelişigüzel hareketlerinin ortalamasıdır. Dahası, bu bilim dalı son derece genel olup sadece ısı motorları için değil, kömür yaktığımızda, demir çiviyi paslanmaya bıraktığımızda, yemek pişirirken, çelik imal ederken, tuzu suda çözerken, çaydanlıkta su kaynatırken ya da aya roket gönderirken gerçekleşen standart kimyanın neredeyse tamamı için geçerlidir. Bütün bu kimyasal işlemler ısı alışverişi gerektirir ve moleküler düzeyde rastgele harekete dayanan termodinamik ilkelere göre gerçekleşir. Aslında dünyamızda değişime

yol açan biyolojik olmayan (fiziksel ve kimyasal) neredeyse bütün süreçler termodinamik ilkeler doğrultusunda gerçekleşir. Okyanus akıntıları, kayaların aşınması, orman yangınları, metallerin korozyona uğraması, bunların hepsi termodinamiği meydana getiren amansız kaos kuvvetleri tarafından kontrol edilir. Her karmaşık süreç bize yapılandırılmış ve kurallı görünse bile özünde hepsini yönlendiren şey gelişigüzel moleküler harekettir.

Yaşam kaos mudur?

O halde aynı durum yaşam için de geçerli mi? Bilardo masamıza geri dönelim hadi, toplar oyunun başında düzgün bir üçgen oluşturacak şekilde dizilsin yine. Ama bu kez fazladan bir yığın top ekleyelim (farz edelim ki masa çok büyük) ve bu topları, üçgen şeklinde yerleştirdiğimiz orijinal toplara kuvvetlice çarpabilecek şekilde konumlandıralım. Bir kez daha, masayı bölen istekanın rastgele çarpışmalara bağlı hareketini faydalı bir iş yapmak için kullanacağız ama bu sefer bir oyuncak treni tepeye doğru tırmandırmak yerine, daha da akıllı bir cihaz tasarlayacağız. Bütün o topların kaotik zıplamalarının harekete geçirdiği makinemiz bu kez oldukça özel bir şey yapacak: Kaos ortamında, üçgen şeklinde dizilmiş topların düzenini koruyacak. Üçgendeki toplardan biri, rastgele hareket eden bir topun çarpmasıyla ne zaman konumunu değiştirse, bir sensör bu olayı algılayarak mekanik bir kolu harekete geçirecek ve üçgendeki eksik topun yerine –üçgenin köşesinde açılan boşluğu doldurabilir mesela– rastgele çarpışan toplar içinden ona özdeş bir top seçip koyacak.

Artık sistemin rastgele moleküler çarpışmalar sonucunda açığa çıkan enerjinin bir kısmını, yüksek düzenli durumunu kısmen korumak için kullandığını fark etmiş olmalısınız. Termodinamikte, düzen eksikliğini tanımlamak için *entropi* terimi kullanılır, dolayısıyla yüksek düzenlilik gösteren durumların entropisi düşüktür. Bilardo masamızın yüksek entropili (kaotik) çarpışmalardan kaynaklanan

enerjiyi, kendi yapısına ait bir parçayı, ortadaki top üçgenini, düşük entropili (düzenli) durumda tutmak için kullandığını söyleyebiliriz.

Şimdilik, böylesine kurnazca tasarlanmış bir düzeneği nasıl yapabileceğimizi bir kenara bırakalım; buradaki asıl mesele, entropiyle harekete geçen bilardo masamızın çok ilginç bir şey yapıyor olması. Sadece topların kaotik hareketinden faydalanarak, toplar, isteka, top algılayıcı sistem ve hareket edebilir koldan oluşan bu yeni sistem, kendi bünyesindeki bir alt sistemin düzenini koruyabiliyor.

Şimdi bunun bir seviye daha karmaşıklaştığını hayal edelim. Bu kez, hareket eden istekadan sağlanan enerji –buna sistemin *serbest enerjisi** diyebiliriz– sensörün ve hareketli kolun *yapımı* ve *idamesi* ve hatta bu cihazların yapımında daha en başından hammadde olarak faydalanılan onca bilardo topunun kullanımında harcanıyor olsun. Artık elimizde, kendi kendini idame ettiren ve rastgele hareket eden çok sayıda top ve istekanın hareket edebileceği yeterli alan sağlandığı sürece prensip olarak kendini sonsuza dek idame ettirebilecek bir sistem var.

Son olarak, kendi kendini idame ettirmenin dışında bu genişletilmiş sistemin şaşırtıcı bir marifeti daha olsun. Açığa çıkan serbest enerjiyi bilardo toplarını saptamak, yakalamak ve düzenleyerek kendini bütün olarak kopyalamak için kullansın: masa, isteka, top algılayıcı sensör, hareketli kol ve top üçgeni. Bu kopyalar da benzer şekilde *kendi* bilardo toplarını ve çarpışmalardan sağlanan serbest enerjiyi, kendi kendini idame ettiren daha fazla sayıda cihaz yapmak için kullanacaktır. Ve bu kopyalar da...

Bunun nereye varacağını tahmin etmiş olmalısınız. Hayalî takyap projemiz, yaşamın bilardo-topu-güdümlü bir eşdeğerini oluşturdu. Tıpkı bir kuş, balık ya da insan gibi, farazi cihazımız da rastlantısal moleküler çarpışmalardan kaynaklanan serbest enerjiyi kendi kendini idame ettirmek ve kendi benzerlerini üretmek için kullanabiliyor.

* "Serbest enerji" termodinamikteki en önemli kavramlardan biridir ve buradaki örnekle gayet iyi bağdaşmaktadır.

Bu çok karmaşık ve zor bir iş olmakla birlikte, hareket ettirici kuvvet genel anlamda buharlı trenleri tepeye doğru itmek için kullanılanla tastamam aynıdır. Yaşam söz konusu olduğunda, bilardo toplarının yerini besinlerden sağlanan moleküller alır, fakat süreç her ne kadar bizim basit örneğimizdekinden çok daha karmaşık olsa da ilke aynıdır: Rastlantısal moleküler çarpışmalardan (ve aralarındaki kimyasal tepkimelerden) kaynaklanan serbest enerji, vücudun idamesi ve bir kopyasının yapılması için yönlendirilir.

O halde, yaşam termodinamiğin bir dalından mı ibarettir? Yürüyüşe çıktığımızda, tepeleri tırmanmamızı sağlayan ve buharlı lokomotifleri yukarı doğru iten süreçler birbirinin aynı mıdır? Bir kızılgerdanın uçuşunun, bir top mermisinin uçuşundan farkı yok mudur? Meselenin özüne baktığımızda, yaşamdaki hayat kıvılcımı rastgele moleküler hareketten mi ibarettir? Bu soruyu yanıtlamak için canlıların detaylı yapısına daha yakından bakmamız gerek.

Yaşamın derinliklerine bakmak

Yaşamın detaylı yapısını aydınlatma konusunda ilk büyük gelişme, on yedinci yüzyılda şişe mantarının ince kesitlerine ilkel mikroskobuyla baktığında gördüğü şeyleri "hücre" olarak tanımlayan "doğa filozofu" Robert Hooke ile göl suyundan aldığı damlalarda "animalkül" adını verdiği, artık tek hücreli yaşam olarak tanımladığımız canlıları gören Hollandalı mikroskop bilgini Anton van Leeuwenhoek tarafından kaydedilmiştir. Leeuwenhoek ayrıca bitki hücrelerini, alyuvarları, hatta sperm hücrelerini de gözlemlemişti. Daha sonraları bütün canlı dokularının bu hücresel birimlerden meydana geldiği anlaşıldı. Alman hekim ve biyolog Rudolf Virchow 1858'de şöyle yazmıştır:

> Nasıl ki bir ağaç belli bir düzen oluşturan kütlesel bir yapıysa ve onun her bir bölümünde, kökte olduğu gibi yapraklarında, çiçekte olduğu gibi gövdesinde temel unsurların hücreler olduğu

> keşfedilmişse, bütün hayvansal yaşam formlarında da öyledir. Her hayvan, her biri yaşamın bütün özelliklerini sergileyen, yaşayan varlıkların toplamı olarak karşımıza çıkar.

Canlı hücreler daha güçlü mikroskoplar tarafından daha ayrıntılı incelendikçe, iç yapılarının son derece karmaşık olduğu ve her birinin merkezinde, kromozomları içeren bir çekirdek ile bunun etrafında, tıpkı vücudumuzdaki organlar gibi hücrede belli işlevleri gerçekleştiren *organel* dediğimiz özelleşmiş alt birimlerin yer aldığı *sitoplazma*nın bulunduğu ortaya çıktı. Örneğin, mitokondri denen organel, insan hücrelerinde solunumu; kloroplast denen organelse bitki hücrelerinde fotosentezi gerçekleştiren yapılardır. Genel olarak baktığımızda hücre minyatür bir fabrikayı andırır. Evet ama bu fabrikanın işlerliğini sağlayan nedir? Hücreyi *canlandıran* nedir? Başlangıçta hücrelerin, Aristoteles'in ruh kavramının eşdeğeri olan "dirimsel" (vital) kuvvetlerle dolu olduğu düşünülüyordu ve on dokuzuncu yüzyılın büyük bölümünde dirimselcilik (vitalizm) –canlı varlıkların, canlı olmayan varlıklarda bulunmayan bir güç sayesinde canlandığı– inanışı devam etti. Hücrelerin, neredeyse mistik terimlerle tarif edilen *protoplazma* denen esrarengiz bir canlı maddeyle dolu olduğu düşünülüyordu.

Fakat on dokuzuncu yüzyılda, laboratuvarda sentezlenen maddelerin aynını canlı hücrelerden de izole eden bilim insanlarının yaptığı çalışmalar dirimselciliğin kuyusunu kazdı. Mesela 1828'de Alman kimyager Friedrich Wöhler, daha önceleri sadece canlı hücrelere özgü olduğu düşünülen bir biyokimyasal madde olan üreyi sentezlemeyi başardı. Hatta Louis Pasteur, canlı hücre özütleri (bunlar daha sonra enzim olarak adlandırılmıştır) kullanarak, evvelden sadece yaşama özgü olduğu düşünülen fermantasyon gibi kimyasal dönüşümleri laboratuvar ortamında gerçekleştirebilmiştir. Canlıları oluşturan maddenin, cansızları oluşturan maddeyle aynı kimyasallardan meydana geldiği, dolayısıyla da muhtemelen aynı kimya tarafından yönetildiği düşüncesi giderek netleşiyordu. Dirimselcilik yerini zaman içinde mekanistik görüşe bıraktı.

On dokuzuncu yüzyılın sonuna gelindiğinde biyokimyacılar dirimselcilere galip gelmişti.* Hücreler, karmaşık bir kimyayla işleyen ama yine de Boltzmann'ın tanımladığı bilardo topu benzeri rastgele moleküler hareketlere dayanan biyokimyasal madde torbaları olarak düşünülüyordu. Genel kanı, yaşamın gerçekten de teferruatlı termodinamikten ibaret olduğuydu.

Bunun tek istisnası vardı ve o da yaşamın en önemli diyebileceğimiz yönüydü.

Genler

İster kızılgerdan, ister ormangülü, ister insan olsun yaşayan bütün organizmaların çoğalabilmek için gereken talimatları orijinal bilgiye sadık kalarak iletebilmesi, yüzyıllar boyu kafa karıştırmıştır. İngiliz cerrah William Harvey, 1653 tarihli "51. Egzersiz" adlı eserinde şöyle yazmıştır:

> Herkesin bildiği üzere, ceninin kökeni ve doğumu erkek ile dişiye dayanır ve nihayetinde yumurta bir horozla tavuk tarafından üretilir, civciv de yumurtadan çıkar; bununla birlikte ne tıp ekolleri ne de Aristoteles'in güçlü idraki, horozun ve tohumunun, yumurtadan çıkan civcivin ana babasına benzemesindeki rolünü izah edebilmiştir.

1850'lerde Brno'daki Augustinyen manastırında bezelye yetiştiren Avusturyalı papaz ve bitkibilimci Gregor Mendel, bu sorunun yanıtını iki yüzyıl sonra kısmen verdi. Gözlemleri onu, çiçek rengi ya da bezelye şekli gibi özelliklerin bir kuşaktan diğerine aktarılmasının, değişmez kalıtsal "faktörler" tarafından kontrol edildiğini ileri sürmeye yöneltti. Mendel'in "faktörler"i, bezelyenin yüzlerce kuşak boyunca özelliğini korumasını –ya da "horozun ve tohumunun,

* Ancak şunu da açıklığa kavuşturalım ki, bazı biyokimyacılar aynı zamanda dirimselci idi.

yumurtadan çıkan civcivin ana babasına benzemesindeki rolünü"– açıklayan bir kalıtsal bilgi deposu sunuyordu.

Mendel'in çalışmaları, Darwin dahil çağcılı bilim insanlarının çoğunun gözünden kaçtı ve ancak yirminci yüzyılın başlarında yeniden günışığına çıktı. Mendel'in faktörlerine *gen* adı verildi ve genler kısa süre içinde yirminci yüzyıl biyolojisinin giderek büyüyen mekanistik uzlaşısının parçası oldu. Mendel canlı hücrelerde bu antitelerin bulunmasının zorunlu olduğunu göstermişti ama onları gören ya da neden yapıldığını bilen yoktu. 1902'de Amerikalı genetikçi Walter Sutton'ın, *kromozom* adı verilen hücre içi yapıların Mendel faktörlerinin kalıtım ilkelerini izlediğini fark etmesi onu, genlerin kromozomlar üzerinde yer aldığını ileri sürmeye götürdü.

Fakat kromozomlar protein, şekerler ve deoksiribonükleik asit ya da kısaca DNA denen biyokimyasal maddeden yapılmış büyük (diğer moleküllere kıyasla) ve karmaşık yapılardır. Başlangıçta bu bileşenlerden hangisinin kalıtımdan sorumlu olduğu belli değildi. Derken 1943'te Kanadalı bilim insanı Oswald Avery, bir bakteri hücresinden diğerine gen aktarımını, verici hücreden elde ettiği DNA'yı alıcı hücreye zerk ederek yapabildi. Deney, yaşam için gerekli bütün genetik bilginin proteinler ya da diğer biyokimyasallar tarafından değil, kromozomlardaki DNA tarafından taşındığını gösterdi.* Yine de görünüşe göre DNA öyle sihirli bir molekül falan değildi; o dönemde sıradan bir kimyasal olduğu düşünülüyordu.

Fakat aynı soru hâlâ yanıt bekliyordu: Bütün bunlar nasıl işliyordu? Bir kimyasal madde nasıl oluyordu da "horozun ve tohumunun, yumurtadan çıkan civcivin ana babasına benzemesi" için gereken bilgiyi sağlayabiliyordu? Genler nasıl oluyordu da bir kuşaktan sonrakine bire bir kopyalanarak aynen aktarılabiliyordu? Boltzmann'ın top benzeri molekülleriyle işleyen konvansiyonel kimya, genetik bilgiyi depolama, kopyalama ve hatasız aktarma için gereken koşulları sağlayabilir nitelikte görünmüyordu.

* Ancak o dönemde Avery'nin deneyleri, DNA'nın genetik madde olduğunun kesin kanıtı olarak kabul edilmedi; bu tartışma Crick ve Watson'ın zamanına kadar sürüp gitti.

Yanıt 1953 yılında, Cambridge'deki Cavendish Laboratuvarı'nda çalışan ve meslektaşları Rosalind Franklin'in DNA'dan elde edilen deneysel verilerinin nasıl bir fevkalade yapıya karşılık geldiğini bulan James Watson ile Francis Crick'ten geldi: çift sarmal. Her DNA ipliğinin, fosfor ve oksijen atomları ile deoksiriboz adlı bir şekerden meydana gelen bir tür moleküler iplik olduğu ve bu ipliğin üzerinde *nükleotid** denen, ipliğe geçirilmiş boncuk benzeri kimyasal yapıların bulunduğu anlaşıldı. Bu nükleotid boncuklar dört çeşittir: adenin (A), guanin (G), sitozin (C) ve timin (T). Dolayısıyla bunların DNA ipliği üzerindeki düzenlenmesi, "GTCCATTGCCCGTATTACCG" gibi tek boyutlu bir genetik harf dizisi oluşturur. Francis Crick'in savaş yıllarında Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'nda (Kraliyet Donanması'nın komutasından sorumlu makam) çalışmış olduğu düşünülürse, Bletchley Park'ta deşifre edilen Alman Enigma makinelerininkine benzer şifrelere aşina olması pekâlâ mümkün. Öyle ya da böyle, bunun bir şifre, kalıtımın önemli talimatlarını içeren bilgi dizisi olduğunu DNA ipliğini görür görmez anlamıştı. Yedinci bölümde göreceğimiz gibi, DNA'nın çift sarmal yapısının tanımlanması, genetik bilginin nasıl kopyalandığı problemini de çözmüştü. Böylece bir taşla iki kuş vurulmuş, bilimin en büyük gizemlerinden ikisi aynı anda çözülmüştü.

DNA'nın yapısının keşfi, genlerin gizemli kapısını açan mekanistik bir anahtar sundu. Genler kimyasal yapılardır ve kimya termodinamikten ibarettir; o halde çift sarmal yapının keşfiyle, yaşam sonunda bütünüyle klasik bilimin alanına mı girmişti?

Yaşamın muzip gülümsemesi

Lewis Carroll'ın *Alice Harikalar Diyarında* adlı kitabındaki Cheshire kedisinin, geride sadece gülümsemesini bırakarak ansızın ortadan kaybolma huyu vardır; Alice "gülümsemesi olmayan kedi

* Bu kimyasal yapılar karbon, azot, oksijen, hidrojen ve en az bir fosfat grubundan oluşan ve DNA ipliğine kimyasal bağlarla tutunan nükleotid bazlarını içerir.

çok gördüm ama kedisi olmayan gülümsemeye hiç rastlamadım," yorumunu yapar. Pek çok biyolog da, termodinamiğin hücrelerde nasıl işlediğini ve genlerin hücreyi oluşturmak için gereken her şeyi nasıl kodladığını bildiği halde, yaşamın gerçekte ne olduğu sorusunun muzipçe gülümsemeye devam ettiğini görünce benzer bir şaşkınlık yaşar.

Sorunlardan biri, yaşayan her hücrenin içinde süregiden biyokimyasal tepkimelerin karmaşıklığıdır. Kimyagerler yapay bir amino asit ya da şeker üretirken, hedef bileşiğin sentezini optimize etmek için, o tepkimeyle ilgili sıcaklık, çeşitli bileşenlerin derişimi gibi deneysel koşulları dikkatle kontrol ederek, bir seferde hemen her zaman tek bir ürün sentezler. Bu hiç de kolay bir iş değildir; konik cam şişelerin, yoğunlaştırıcıların, ayırma sütunlarının, filtrasyon cihazlarının ve özenle hazırlanmış diğer araç gerecin içindeki pek çok farklı koşulun dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Oysa vücudunuzdaki her bir hücre, birbirinden farklı binlerce biyokimyasalı bir mikrolitrenin birkaç milyonda biri kadar sıvıyla dolu bir tepkime odasında aralıksız sentezlemektedir.* Birbirinden farklı onca tepkime eşzamanlı olarak nasıl gerçekleşebilmektedir? Ve bütün bu moleküler aksiyon mikroskobik bir hücrenin içinde nasıl idare edilir? Bu sorular, yeni bir bilim olan *sistemler biyolojisi*nin odak noktasıdır, ancak şunu açıkça itiraf edelim ki yanıtlar hâlâ gizemini korumaktadır!

Yaşamın bir diğer bulmacasıysa ölümlülüktür. Kimyasal tepkimelerin bir özelliği, her zaman tersinir (geri dönüşlü) olmasıdır. Bir kimyasal tepkimeyi substratlar → ürünler yönünde yazabiliriz. Ama aslında tepkime aynı zamanda, ürünler → substratlar şeklinde ters yönde de ilerler. Fakat belli koşullar altında iki yönden biri hâkimdir. Bununla birlikte, tepkimenin ters yönde gerçekleşmesini sağlayacak başka koşullar bulmak her zaman mümkündür. Örneğin; fosil yakıtlar yanarken substratlar karbon ve oksijen,

* Bir mikrolitre suyun hacmi bir milimetreküptür.

tek ürünse bir sera gazı olan karbondioksittir. Bu, normalde geri dönüşsüz bir tepkime olarak kabul edilirse de bazı karbon yakalama teknolojisi türleri, tepkimeyi geri döndürecek bir enerji kaynağı kullanarak süreci ters yönde işletme üzerinde çalışıyor. Sözgelimi Illinois Üniversitesi'nden Rich Masel'in kurduğu Dioxide Materials adlı şirket, elektrik enerjisi kullanarak atmosferdeki karbondioksiti araç yakıtına çevirmeyi hedefliyor.[1]

Oysa yaşam farklıdır. Bugüne kadar hiç kimse işleyişi ölü hücre → canlı hücre lehine çevirecek bir koşul bulamamıştır. Atalarımızın ruh kavramını ortaya atmasına neden olan bulmaca buydu elbette. Hücrenin bir ruhu olduğuna inanmıyoruz artık; bir hücre ya da insan öldüğünde geri döndürülemez biçimde kaybolan şey nedir o halde?

Bu noktada aklınıza şu soru gelebilir: Peki ya şu yeni yeni filizlenen sentetik biyoloji bilimi? Bu bilim dalının uygulamacıları yaşamın gizemli kilidini açan anahtarı elinde tutuyor olsa gerek, değil mi? Sentetik biyolojinin herhalde en ünlü uygulamacısı, 2010 yılında *yapay yaşam* yarattığını açıklayarak bilim dünyasında fırtınalar koparan, genom dizileme öncüsü Craig Venter'dır. Venter'ın çalışması bütün dünyada manşetlere taşınmış, yapay olarak yetiştirilmiş yeni ırkların gezegeni istila etmesi korkusunu tetiklemiştir. Fakat Venter ile ekibi, gerçek anlamda yeni bir yaşam yaratmaktan çok, mevcut yaşam biçimini değiştirmiştir sadece. Öncelikle, keçilerde hastalığa yol açan bir bakteriyel patojen olan *Mycoplasma mycoides*'in bütün genomunu kodlayan DNA'yı sentezlemişlerdir. Sonra da sentezledikleri DNA genomunu canlı bir bakteri hücresine enjekte ederek, büyük bir kurnazlıkla bu bakteriyi kendi orijinal (ve tek) kromozomu yerine, sentezlenmiş olanı kabul etmesi için kandırmışlardır.

Bu çalışma hiç kuşkusuz teknik açıdan büyük bir başarıdır. Bakteri kromozomu, tastamam doğru biçimde birbirine eklenmesi gereken 1,8 milyon genetik harf içerir. Fakat aslında bu bilim insanlarının yaptığı, gıdalardan gelen atıl kimyasalları kendi kanlı canlı bedenimize çevirirken zahmetsizce yaptığımız dönüşümü gerçekleştirmekti.

Venter ile ekibinin, bakteri kromozomunun yerine konacak genomu başarıyla sentezleyip bakteriye yerleştirmesi, son bölümde tekrar döneceğimiz sentetik biyolojide tamamen yeni bir alan açmakta. Bu alanın ilaç üretimi, tarım faaliyetleri ya da çevre kirleticileri ortadan kaldırmak için daha verimli yollar sunması muhtemel. Ancak bilim insanları ne bu deneyde ne de benzerlerinde yeni bir yaşam yaratabilmiştir. Venter'ın başarısına rağmen, yaşamın özünde yatan gizem bize hâlâ gülümsüyor. Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman, "yapamıyorsak anlayamıyoruzdur," düsturuyla tanınır. Bu tanıma göre, yaşamı anlayamıyoruz çünkü henüz onu yapmayı başaramadık. Biyokimyasalları karıştırabilir, ısıtabilir, ışınlara tabi tutabiliriz; hatta Mary Shelley'nin Frankenstein'da yaptığı gibi, elektrik enerjisiyle onları hareketlendirebiliriz; ancak yaşamı yaratabilmek adına tek yapabildiğimiz, bu biyokimyasalları zaten canlı olan hücrelere enjekte etmek ya da onları yiyerek kendi vücudumuzun bir parçası haline getirmekten ibaret.

Öyleyse, en basit mikroorganizmaların saniyede trilyonlarca kez zahmetsizce gerçekleştirdiği bir numarayı neden hâlâ beceremiyoruz? Bir şeyi mi gözden kaçırıyoruz? Ünlü fizikçi Erwin Schrödinger'in yetmiş yılı aşkın bir süre önce üzerinde düşündüğü soru işte budur ve onun bu soruya verdiği son derece şaşırtıcı yanıt, bu kitabın ana eksenini oluşturmaktadır. Schrödinger'in, yaşamın en derin gizemlerine ilişkin getirdiği çözümün neden günümüzde bile devrimsel nitelik taşıdığını anlayabilmek için, yirminci yüzyılın başına, çift sarmalın henüz keşfedilmediği, fizik dünyasının tepetaklak edildiği döneme geri dönmemiz gerek.

Kuantum devrimi

On sekizinci ve on dokuzuncu yüzyıl aydınlanma çağında bilimsel bilginin patlama yapmasıyla birlikte Newton mekaniği, elektromanyetizma ve termodinamik alanları ortaya çıkmıştı ve bu üç alan top mermilerinden saatlere, fırtınalardan buharlı trenlere, sarkaçlardan

gezegenlere günlük hayatın makroskobik cisimlerini ve dünyamızdaki fenomenleri başarıyla açıklayabiliyordu. Fakat on dokuzuncu yüzyılın sonu ve yirminci yüzyılın başlarında, fizikçiler dikkatlerini maddenin mikroskobik bileşenleri olan atomlar ve moleküllere çevirince, bildik kanunların geçerli olmadığını fark ettiler. Fiziğin bir devrime ihtiyacı vardı.

İlk büyük aşamayı –"kuantum" kavramı– 14 Aralık 1900'de Alman Fizik Derneği'nin bir seminerinde sonuçlarını sunan Alman fizikçi Max Planck kaydetti; bu tarih kuantum kuramının doğum tarihi olarak kabul edilmektedir. O dönemin klasik anlayışına göre ısı ışınımı, uzayda diğer enerji türleri gibi dalga biçiminde yayılıyordu. Ancak sorun şuydu ki, dalga teorisi belli bazı sıcak cisimlerin nasıl enerji ışınımı yaptığını açıklayamıyordu. Bunun üzerine Planck, bu sıcak cisimlerin duvarlarındaki maddenin belli frekanslarda titreştiğine ve bunun sonucunda ısı enerjisinin, daha küçük birimlere ayrılamayan "kuantum" denen öbekler halinde yayıldığına dair radikal bir görüş ortaya attı. Planck'ın kayda değer bir başarı elde eden basit kuramı aynı zamanda, enerjinin süreklilik arz ettiğini savunan *klasik* ışınım teorisinden radikal bir sapmaydı. Planck'ın kuramı, enerjinin maddeden, suyun musluktan kesintisiz akarken olduğu gibi değil de, yavaş yavaş damlarken olduğu gibi birbirinden ayrı, bölünemeyen paketler halinde çıktığını ileri sürüyordu.

Enerjinin öbekler halinde bulunması fikri Planck'ın içine sinmemişti ama kuantum teorisini ortaya atmasından beş yıl sonra Albert Einstein bu fikri daha da genişleterek, ışık dahil bütün elektromanyetik radyasyon türlerinin kesintisiz değil "kuantize" olduğunu ve şimdi foton olarak adlandırdığımız ayrı paketler ya da parçacıklar halinde yayıldığını ileri sürdü. Işığı bu bakış açısıyla düşünmenin, uzun zamandır çözülemeyen bir bilmece olan fotoelektrik etkiyi, yani ışığın elektronları maddenin dışına fırlatabilmesi fenomenini de açıklayabileceğini öne sürdü. Einstein'a 1921'de Nobel Ödülü'nü kazandıran ünlü görelilik kuramları değil, bu çalışması olacaktı.

Ama ışığın kesintisiz bir dalga halinde yayıldığına dair de epeyce kanıt vardı. Öyleyse ışık nasıl hem öbekler hem de dalgalar halinde bulunabiliyordu? O dönemde bu, en azından klasik bilim çerçevesinde pek de mantıklı görünmüyordu.

Bir sonraki dev adımı, 1912 yılında Manchester'da Ernest Rutherford'la birlikte çalışmaya başlayan Danimarkalı fizikçi Niels Bohr attı. Rutherford gezegen benzeri ünlü atom modelini daha yeni öne sürmüştü; bu modele göre atom ortada küçük, yoğun bir çekirdek ve bunun etrafındaki yörüngede dönen daha da küçük elektronlardan oluşuyordu. Fakat hiç kimse atomların nasıl kararlı durumda kaldığını anlayamıyordu. Standart elektromanyetizma teorisine göre, negatif yüklü elektronlar pozitif yüklü çekirdeğin etrafında dönerken sabit bir ışık enerjisi yayıyor olmalıydı. Bu durumda elektronlar enerji kaybedecek ve çabucak (saniyenin katrilyonda biri kadar sürede) çekirdeğe doğru çekilerek atomun içe çökmesine neden olacaktı. Ama elektronlar bunu yapmaz. O halde işin sırrı neydi?

Bohr atomların kararlılığını açıklamak için, elektronların çekirdek etrafında herhangi bir yörünge işgal etmekte özgür olmadığını, sadece belli sabit ("kuantize") yörüngelerde bulunduğunu ileri sürdü. Belli bir yörüngedeki elektron, bir alttaki enerji yörüngesine inerken, ilgili iki yörünge arasındaki enerji farkına eşit bir elektromanyetik enerji öbeği ya da kuantumu kadar enerji (bir foton) yayar. Benzer şekilde bir üst enerji seviyesindeki yörüngeye sıçrayabilmesi için de uygun enerjili bir fotonu soğurması gerekir.

Klasik kuram ile kuantum teorisi arasındaki farkı gözünüzde canlandırmak ve elektronun atom içinde neden sadece belli sabit yörüngelerde bulunabileceğini açıklamak için, gitar ve keman çalmak arasındaki farkı düşünün. Keman virtüözü bir notayı çalarken parmağını tellerden birine, kemanın sapı üzerinde herhangi bir yere basarak telin boyunu kısaltır ve böylece yayı çekerken teli titreştirerek notanın sesini çıkarır. Daha kısa teller daha yüksek frekansta titreşerek (saniyedeki titreşim sayısı fazla) daha tiz notalar

çıkarırken, daha uzun teller daha düşük frekanslarda titreşerek (saniyedeki titreşim sayısı az) daha pes notalar çıkarır.

Devam etmeden önce, kuantum mekaniğinin, frekansla enerjinin yakından ilişkili olmasını sağlayan temel özelliklerinden biri hakkında birkaç şey söyleyelim.* Geçen bölümde atomaltı parçacıkların aynı zamanda dalga özellikleri gösterdiğini, yani dalga gibi yayıldığını, bir dalga boyuna ve salınım [osilasyon] sıklığına sahip olduğunu gördük. Hızlı titreşimler [vibrasyon] ve salınımlar, yavaş titreşimlere göre her zaman daha enerjiktir. Çamaşır kurutma makinenizi düşünün, giysilerdeki suyu dışarı atacak enerjiye sahip olmak için yüksek bir frekansta dönmesi (osilasyon yapması) gerekir.

Şimdi kemanımıza geri dönelim. Ses perdesi (titreşim frekansı) telin sabit ucuyla virtüözün parmağı arasındaki telin uzunluğuna göre sürekli değişebilir. Bu durum, herhangi bir dalga boyunda (dalganın ardışık tepeleri arasındaki mesafe) olabilecek klasik dalganın eşdeğeridir. O nedenle, kemanı *klasik* bir çalgı –"klasik müzik" anlamında değil de kuantize olmayan klasik fizik anlamında– olarak tanımlayacağız. Keman çalmanın zorluğu da bundan kaynaklanır tabii; müzisyen doğru notayı çalmak için parmağını tam olarak nereye koyacağını bilmek zorundadır.

Ama gitarın sapı farklıdır; boylu boyunca belli aralıklarla "perdelere" bölünmüştür; perdeleri ayıran metal çubuklar yüzeyden hafif bir çıkıntı yapar ama tellere değmez. Dolayısıyla gitarist parmağını telin üzerine bastırınca, teli aşağıya, perdeye doğru iter; bu durumda telin bir ucu geçici olarak gitaristin parmağıyla değil perdenin kendisiyle sonlanır. Gitarist tele dokunduğunda duyulan nota, telin perde ile köprü arasındaki titreşiminden çıkar. Sonlu sayıda perde olması, gitarda yalnızca belli sayıda farklı nota çalınabileceği anlamına gelir. Parmağın pozisyonunu iki perde arasında ayarlamak, tele dokunduğunuzda çıkan notayı değiştirmez. Dolayısıyla gitar

* Bu ilişki 1900'de Max Planck'ın önerdiği formülde yer alır. $E = h\nu$ şeklinde yazılan formülde E enerjiyi, ν frekansı temsil eder, h ise Planck sabitidir. Bu formülden de göreceğiniz gibi enerji frekansla doğru orantılıdır.

bir *kuantum* çalgıya karşılık gelir. Kuantum teorisine göre frekans ile enerji ilişkili olduğu için titreşen gitar telinin enerjileri kesintisiz değil de ayrık olmalıdır. Benzer şekilde, elektronlar gibi temel parçacıklar sadece belli karakteristik dalga frekanslarıyla ilişkilidir; her biri kendi ayrı enerji seviyesinde bulunur. Bir enerji seviyesinden diğerine sıçrarken, bulunduğu ve geçtiği seviyeler arasındaki enerji farkı kadar bir ışınım yayar ya da soğurur.

Kopenhag'a dönen Bohr 1920'lerin ortasında, atomaltı dünyasında neler olup bittiğini tanımlayacak daha eksiksiz ve uyumlu bir matematiksel kuram geliştirmek için hummalı bir çalışma yürüten Avrupalı fizikçilerden biriydi. Bu grubun en parlak simalarından bir diğeri genç Alman dâhi Werner Heisenberg'di. 1925 yazında bir Alman adası olan Heligoland'da, geçirdiği saman nezlesi nöbetinden iyileşirken Heisenberg, atomların dünyasını tanımlamak için gereken yeni matematiği meydana getirmekte önemli bir aşama kaydetti. Fakat bu biraz tuhaf bir matematikti, hatta atomlara dair bize söyledikleri daha da tuhaftı. Heisenberg, ölçüm yapmadığımız sürece bir elektronun tam olarak nerede bulunduğunu söyleyemeyeceğimizi savunmakla kalmıyor, elektronun kendisinin de bilinemez ve belirsiz bir şekilde yayıldığı için belli bir konumu olmadığını iddia ediyordu.

Heisenberg atomların dünyasının, ancak ve ancak o dünyayla etkileşime girebilecek bir ölçüm cihazı kullandığımızda belirginleşip net bir varlık kazanan, hayaletimsi, maddesiz bir yer olduğu sonucuna varmak zorunda kaldı. İşte bu, geçen bölümde sözünü ettiğimiz kuantum ölçümdür. Heisenberg, cihaz hangi özellikleri ölçmek için tasarlanmışsa, ölçüm sürecinin sadece o özellikleri açığa çıkarabileceğini gösterdi; tıpkı bir arabanın kontrol panelindeki göstergelerden her birinin hız, kat edilen mesafe ya da motorun sıcaklığı gibi, işleyişin tek bir yönüyle ilgili bilgi vermesi gibi. Yani belli bir zamanda bir elektronun kesin konumunu belirlemek için bir deney düzenleyebilir, aynı elektronun hızını ölçmek içinse farklı bir deney tasarlayabilirdik. Fakat Heisenberg, bir elektronun hem

nerede hem ne kadar hızlı olduğunu aynı anda ölçebileceğimiz tek bir deney düzenlemenin imkânsız olduğunu matematiksel olarak kanıtladı. 1927'de bu kavramı ünlü Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi başlığı altında özetledi; kavram daha sonra dünyanın her yanındaki laboratuvarlar tarafından binlerce kez doğrulandı. Belirsizlik İlkesi halen bilim dünyasındaki en önemli fikirlerden, kuantum mekaniğinin de temel taşlarından biridir.

Ocak 1926'da, Heisenberg'in fikirlerini geliştirdiği sırada, Avusturyalı fizikçi Erwin Schrödinger atomu çok farklı resmeden bir makale yazdı. Makalede, bugün artık Schrödinger denklemi olarak bilinen, parçacığın nasıl hareket ettiğini değil de dalganın nasıl geliştiğini açıklayan matematiksel bir denklem geliştirdi. Elektronun, çekirdek etrafındaki yörüngesinde dönen, konumu bilinemez belirsiz bir parçacık olmaktan ziyade, atom boyunca yayılmış bir dalga olduğunu ileri sürüyordu. Bir elektronu ölçmediğimiz takdirde onu asla gözümüzde canlandıramayacağımıza inanan Heisenberg'in aksine Schrödinger, elektronun bakmadığımız zaman gerçek bir fiziksel dalga olduğunu, baktığımız andaysa bir kesintili parçacığa "çöktüğünü"* düşünmeyi tercih ediyordu. Onun bu atom kuramı yorumu *dalga mekaniği* olarak bilinir, ünlü denklemiyse bu dalgaların zaman içinde nasıl değiştiğini ve davrandığını açıklar. Günümüzde Heisenberg ve Schrödinger'in açıklamaları, kuantum mekaniği matematiğini yorumlamanın farklı yolları olarak düşünülmektedir ve her ikisi de kendince doğrudur.

Schrödinger'in dalga fonksiyonu

İster top mermileri ister buharlı trenler ya da gezegenler olsun, günlük hayata dair, her biri trilyonlarca parçacıktan oluşan cisimlerin hareketini tarif ederken, problemi çözmek için Isaac Newton'un

* Bu süreç "dalga fonksiyonunun çökmesi" olarak da adlandırılır ve çağdaş standart ders kitaplarında gerçek bir dalganın fiziksel çöküşünden çok, elektronun matematiksel tanımlamasındaki değişime karşılık gelir.

çalışmalarına dayanan bir dizi matematiksel denklem kullanırız. Fakat eğer tarif ettiğimiz sistem kuantum dünyasına aitse, o zaman Schrödinger'in denklemini kullanırız. İşte iki yaklaşım arasındaki derin fark tam da burada yatar; zira Newtoncu dünyamızda bir harekete ilişkin denklemin çözümü, bir cismin zaman içindeki belli bir anda kesin yerini belirten bir sayı ya da sayılarla ifade edilir. Oysa kuantum dünyasında, Schrödinger denkleminin çözümü, dalga fonksiyonu denen ve bize, diyelim ki bir elektronun zaman içinde belli bir anda kesin yerini *değil de*, elektronun *onu orada arıyor olmamız halinde* uzayın farklı yerlerinde bulunma *olasılığını* tanımlayan bir sayılar kümesi verir.

Tabii ki ilk tepkiniz şöyle olacak: Ama bu yeterli değil; elektronun nerede *olabileceğini* söylemek o kadar da işe yarar bir bilgi gibi görünmüyor. Parçacığın tastamam nerede *olduğunu* bilmek istersiniz. Ancak uzayda belli bir konum işgal eden klasik bir cisimden farklı olarak bir elektron, ölçüldüğü âna dek aynı anda birçok yerde birden bulunabilir. Kuantum dalga fonksiyonu bütün uzaya yayılmıştır, yani bir elektronu tarif ederken yapabileceğimizin en iyisi, onu tek bir yerde değil, uzayda aynı anda her bir noktada bulma olasılığımızı ifade eden bir sayılar kümesi hesaplamaktır. Bununla birlikte, bu kuantum olasılıklarının, daha fazla veri toplayarak giderilebilecek bir bilgi eksiğini yansıtmadığını anlamamız önemli; bu olasılıklar daha çok, mikroskobik ölçekteki doğal dünyanın temel bir özelliği olarak görülmeli.

Bir mücevher hırsızının şartlı tahliye edildiğini düşünün. Hırsız dürüst bir hayata adım atmak yerine eski alışkanlıklarına geri dönüyor ve şehrin her yerinde evlere girmeye başlıyor. Polis harita üzerinde, hırsızın salıverildiği andan itibaren bulunabileceği yerlerin izini sürebilir. Herhangi bir anda tam olarak nerede olduğunu saptayamasalar da, farklı bölgelerde meydana gelen hırsızlıkların onun tarafından yapılmış olma olasılıklarını belirleyebilirler.

Başlangıç olarak, hapishaneye en yakın evler en fazla risk altında olanlardır, ancak zaman içinde tehdit altındaki alan genişler.

Ayrıca polis, hırsızın geçmişte ne tür şeyler çaldığına bakarak, kıymetli mücevheratın bulunduğu daha zengin bölgelerin, fakir bölgelere göre daha büyük risk taşıdığını belli bir güvenle söyleyebilir. Şehirde yayılan bu tek kişilik suç dalgası, bir olasılık dalgası gibi düşünülebilir. Elle tutulabilir değildir, gerçek değildir, sadece şehrin çeşitli yerlerine atanabilecek bir soyut sayılar kümesinden ibarettir. Benzer şekilde, bir elektronun son olarak görüldüğü noktadan bir dalga fonksiyonu yayılır. Bu dalga fonksiyonunun farklı konumlarda ve farklı zamanlardaki değerini hesaplarsak, bir dahaki sefere nerede görülebileceğine dair olasılıkları da belirleyebiliriz.

Peki, eğer polis ihbar üzerine hırsızı sırtına vurduğu "ganimet" yüklü çantayla pencereden dışarı çıkmak üzereyken suçüstü yakalarsa ne olur? Hırsızın bulunabileceği yerleri tanımlayan yayılmış olasılık dağılımı o anda kesin ve tek bir konuma çöker. Benzer şekilde, bir elektron da belli bir yerde saptandığı anda dalga fonksiyonu değişir. Tam o anda elektronu başka bir yerde bulma olasılığımız sıfırdır.

Ancak, hırsızı yakalamadan önce onun bulunduğu yere dair sadece olasılıklar belirleyebilen polis, bunun veri eksikliğinden kaynaklandığını bilir ve benzetmemiz de bu noktada çöker. Ne de olsa hırsız kendini gerçekten de bütün şehre yaymamıştır ve polis onun herhangi bir yerde olabileceğini düşünürken, o aslında belli bir anda tek bir yerdedir şüphesiz. Fakat hırsız örneğinin tam aksine, bir elektronun hareketini izlemediğimizde onun yine de belli bir zamanda kesinlikle belli bir yerde olduğunu varsayamayız. Tek tanımlamamız gereken onun dalga fonksiyonudur ki o da her an her yerdedir. Bakma eylemini gerçekleştirerek (ölçüm yaparak) ancak elektronu konumu belli bir parçacık olmaya "zorlayabiliriz."

1927 yılına gelindiğinde, Heisenberg, Schrödinger ve diğerlerinin çabaları sayesinde, kuantum mekaniğinin matematiksel dayanakları esasen tamamlanmıştı. Günümüzde bu dayanaklar, evrenin yapıtaşlarının çarpıcı ve eksiksiz bir görüntüsünü sunar, ve fizik ve kimyanın büyük ölçüde üzerine inşa edildiği temeli oluşturur. Gerçekten de kuantum mekaniğinin, her şeyin birbirine nasıl uyduğunu

açıklayıcı gücü olmasaydı, modern teknolojik olanakların büyük bölümünden mahrum kalırdık.

1920'lerin sonlarında, atom dünyasını ehlileştirmeyi başarmanın coşkusuyla dolup taşan kuantum öncüleri, fizik laboratuvarlarından çıkıp bilimin farklı bir alanını fethetmeye koyuldular: Biyoloji.

Erken dönem kuantum biyologları

1920'lerde yaşam hâlâ bir gizemdi. Her ne kadar on dokuzuncu yüzyıl biyokimyacıları, yaşamın kimyasına ilişkin mekanistik bir anlayış inşa etmede büyük ilerleme kaydetmiş olsalar da, pek çok bilim insanı o dönemde hâlen, biyolojinin kimya ve fiziğe indirgenemeyeceğini, kendi kanunları olması gerektiğini savunan dirimselci ilkeye sımsıkı tutunuyordu. Canlı hücrelerin içindeki "protoplazma"nın hâlâ, bilinmeyen kuvvetler tarafından harekete geçirilen gizemli bir tür madde olduğu düşünülüyor, kalıtımın sırrı gelişen genetik biliminden yakayı sıyırmaya devam ediyordu.

Fakat o on yıl içinde, gerek dirimselcilerin gerekse mekanistlerin ideallerini reddeden, organikçiler olarak bilinen yeni bir bilim insanı kuşağı ortaya çıktı. Bu bilim insanları, yaşamın gizemli bir yönü olduğunu kabul etmekle birlikte, bu gizemin ilkesel olarak henüz keşfedilmemiş fizik ve kimya kanunlarıyla *açıklanabileceğini* iddia ediyorlardı. Organikçi hareketin en önemli taraftarlarından biri, biyolojik gelişimle ilgili ilk makalelerden bazılarını yazan ve 1928 tarihli kitabı *Kritische Theorie der Formbildung*'da [*Eleştirel Morfogenez Kuramı*] yaşamın esasını tanımlayacak yeni bir biyolojik ilkeye ihtiyaç olduğunun altını çizen yine bir başka Avusturyalı, egzotik isimli Ludwig von Bertalanffy idi. Onun fikirleri ve özellikle de adı geçen kitabı pek çok bilim insanını etkilemiştir; onlardan biri de bir başka öncü kuantum fizikçisi olan Pascual Jordan'dır.

Hanover'da doğan ve eğitim gören Pascual Jordan, Almanya'nın Göttingen kentinde, kuantum mekaniğinin kurucularından Max

Born'un* yanında çalışıyordu. 1925 yılında Jordan ile Born "Zur Quantenmechanik" ("Kuantum Mekaniği Üzerine") başlıklı klasik makaleyi yayımladılar. Bir yıl sonra bir "devam" yazısı niteliğindeki "Zur Quantenmechanik II" Jordan, Born ve Heisenberg tarafından yayımlandı. *Dreimännerwerk* olarak da bilinen bu "üç yazarlı makale", Heisenberg'in çığır açan buluşunu kullanarak, atom dünyasının davranışını resmeden zarif bir matematiksel yöntem geliştirdiği için kuantum mekaniğinin klasiklerinden biri kabul edilir.

Ertesi yıl Jordan, o kuşaktan özsaygısı olan hiçbir Avrupalı genç fizikçinin kaçırmak istemeyeceği fırsatı değerlendirerek, Kopenhag'da Niels Bohr ile bir süre çalıştı. 1929'a doğru bu iki bilim insanı kuantum mekaniğinin biyoloji alanına uygulanıp uygulanamayacağını tartışmaya başlamışlardı. Pascual Jordan, Rostock Üniversitesi'ndeki görevi kabul edip Almanya'ya döndü; sonraki birkaç yıl boyunca Bohr ile fizik ve biyoloji arasındaki ilişki üzerine yazıştılar. İkilinin fikirleri, 1932'de bir Alman dergisi olan *Die Naturwissenschaften*'da yayımlanan, Jordan'ın yazdığı ve kuantum biyolojisi alanındaki ilk bilimsel makale kabul edilen "Die Quantenmechanik und die Grundprobleme der Biologie und Psychologie" ("Kuantum mekaniği ve biyoloji ile psikolojinin temel problemleri") başlıklı yazıda meyvesini vermiştir.[2]

Jordan'ın yazılarının yaşam fenomenine ilginç bakış açıları getiren yönleri vardır, ancak biyoloji üzerine spekülasyonları, giderek daha siyasileşmiş ve Nazi ideolojisinin çizgisine yaklaşmış, hatta tek bir diktatör lider (*Führer)* ya da kılavuz kavramının yaşamın merkezî ilkesi olduğunu iddia etmeye kadar varmıştır.

> Biliyoruz ki bir bakteride, bu . . . canlıyı . . . oluşturan sayısız molekül arasında organizmanın tamamı üzerinde diktatörlük otoritesine sahip çok az sayıda özel molekül bulunmaktadır; onlar canlı hücrenin *Steuerungszentrum*'unu [yönetici merkez]

* Schrödinger'in dalga fonksiyonu ile kuantum mekaniğindeki olasılıklar arasında ilk bağlantıyı kuran Max Born'dur.

> oluşturur. Tek bir askerin öldürülmesi büyük bir ulusun yok olmasına hangi ölçüde neden olabilirse, bu *Steuerungszentrum* dışında herhangi bir yerde ışık kuantumunun soğurulması da hücreyi ancak o *ölçüde* öldürebilir. Fakat ışık kuantumunun hücrenin *Steuerungszentrum*'unda soğurulması, tıpkı lider konumundaki [*führenden*] devlet adamına karşı düzenlenen ve başarıya ulaşan bir saldırının bütün ulusu derinden parçalanmaya mahkûm etmesi gibi, bütün organizmayı ayrışmaya götürebilir.[3]

Nazi ideolojisini biyolojiye aktarmaya yönelik bu girişim hem etkileyici hem de ürkütücüdür. Ancak bünyesinde, Jordan'ın *Verstärkertheorie* ya da amplifikasyon kuramı dediği ilginç fikrin nüvesini taşır. Jordan, cansız nesnelerin milyonlarca parçacığın ortalama rastgele hareketiyle yönetildiğine ve böylece tek bir molekülün nesnenin bütünü üzerinde etkisi olmadığına işaret etmiştir. Buna karşılık yaşamın farklı olduğunu çünkü diktatör etkisi olan *Steuerungszentrum*'da yer alan çok az sayıda molekül tarafından yönetildiğini ve böylece hareketlerini idare eden Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi gibi kuantum düzeyindeki olayların amplifiye olarak bütün organizmayı etkilediğini savunmuştur.

Bu, daha sonra döneceğimiz ilginç bir anlayıştır, ancak o dönemde gelişimini tamamlamadığı gibi, Almanya'nın 1945'teki yenilgisinin ardından, Nazi siyasetçilerin gözünden düşen Jordan'ın kuantum biyolojisiyle ilgili görüşleri çağdaşları arasında göz ardı edildiği için pek fazla etkisi olmamıştır. Biyoloji ile kuantum fiziği disiplinleri arasındaki diğer çöpçatanlar, savaşın getirdiği yıkımla dört bir yana dağılmıştı ve atom bombasının kullanılmasıyla derinden sarsılan fizik bilimi dikkatini daha geleneksel sorunlara yöneltmişti.

Ama kuantum biyolojisinin ateşini canlı tutan kişi, kuantum dalga mekaniğini bulan Erwin Schrödinger'den başkası olmayacaktı. Schrödinger, İkinci Dünya Savaşı ufukta gözükünce, eşi Nazi yasalarına göre Ari ırktan sayılmadığı için Avusturya'dan kaçıp İrlanda'ya yerleşmiş ve burada 1944 yılında *What Is Life?* [*Yaşam*

Nedir?] adlı kitabı yayımlanmıştı. Schrödinger'in biyolojiye getirdiği yenilikçi bakış kuantum biyolojisinin hâlâ merkezinde olduğu gibi bu kitabın da özünü oluşturmaktadır. Bu tarihî bölüme nokta koymadan önce Schrödinger'in içgörüsünü biraz daha derinlemesine inceleyeceğiz.

Tepeden tırnağa düzen

Schrödinger'in ilgisini çeken problem, gizemli bir süreç olan kalıtımdı. Hatırlarsanız o dönemde, yani yirminci yüzyılın ilk yarısında genlerin bir kuşaktan diğerine aktarıldığı biliniyordu ama neden yapıldığı ya da nasıl çalıştığı bilinmiyordu. Schrödinger, kalıtımda yüksek düzeydeki aslına uygunluk özelliğini hangi kanunların sağladığını merak ediyordu. Bir başka deyişle, özdeş gen kopyaları nasıl oluyordu da bir kuşaktan sonrakine değişmeden geçebiliyordu?

Schrödinger, atomların ve moleküllerin rastgele hareketlerinden kaynaklanan termodinamik yasaları gibi, klasik fizik ve kimyanın kesin ve tekrar tekrar kanıtlanabilen yasalarının istatistiksel kanunlar olduğunu biliyordu; yani söz konusu kanunlar sadece *ortalama* olarak doğruydu ve ancak etkileşim halindeki çok çok fazla sayıda parçacığı kapsadığı için güvenilirdi. Bilardo masamıza geri dönecek olursak, tek bir topun hareketini öngöremezsiniz ama masaya bir yığın top atar da onları bir saat boyunca rastgele çarpıştırırsanız, çoğunun eninde sonunda deliklere gireceğini öngörebilirsiniz. Termodinamik kanunları da böyle çalışır: öngörülebilir olan, tek tek moleküllerin değil, çok sayıdaki molekülün ortalama davranışıdır. Schrödinger, termodinamikteki gibi istatistiksel kanunların az sayıda parçacıktan oluşan sistemleri doğru biçimde tanımlayamayacağına dikkat çekmişti.

Üç yüz yıl önce Robert Boyle ve Jacques Charles tarafından tarif edilmiş gaz kanunlarını düşünün. Bu yasalar bir balonun içindeki gaz hacminin, ısıtıldığında nasıl genleştiğini ve soğutulduğunda nasıl büzüldüğünü açıklar. Bu davranış, ideal gaz yasası olarak

bilinen basit bir matematiksel formülle ifade edilebilir.* Bir balon bu sistemli yasalara uyar: ısıtırsanız genişler; soğutursanız büzülür. Tamamen rastgele hareketlerle birbiriyle çarpışan, itiş kakış halinde balonun iç çeperine çarpıp seken düzensiz bilardo topları gibi davranan trilyonlarca molekülle dolu olmasına rağmen bu yasalara uyar. Düzensiz hareketler nasıl olur da düzenli yasalar oluşturabilir?

Balon ısıtıldığı zaman, hava molekülleri daha hızlı titreşmeye başladığı için gerek birbirlerine gerekse balonun çeperine biraz daha kuvvetlice çarparlar. Bu ek kuvvet, balonun esnek duvarına daha fazla basınç uygulayarak (tıpkı Boltzman'ın bilardo masasındaki hareketli istekaya uyguladığı gibi) onun şişmesine neden olur. Balonun ne kadar şiştiği, ne kadar ısı verildiğine bağlıdır ve gaz yasalarınca tamamıyla öngörülebilirdir ve tarif edilmiştir. Buradaki önemli nokta, çok çok fazla sayıda parçacığın, Schrödinger'in ifadesiyle, düzensizlikten düzen yaratan düzensiz hareketlerinin balonun kesintisiz, yekpare elastik yüzeyinin düzenli hareketine sebep olması sayesinde balonun gaz yasasına katı katıya bağlı kalmasıdır.

Schrödinger, kesinliğini büyük sayıların istatistiksel özelliklerinden alan yasaların sadece gaz yasaları olmadığını, klasik fizik ve kimyanın *bütün* kanunlarının –sıvı dinamikleri ya da kimyasal tepkimelerle ilgili kanunlar dahil– "büyük sayıların ortalaması"na ya da "düzensizlikten doğan düzen" ilkesine dayandığını savunuyordu.

Ancak trilyonlarca hava molekülüyle dolu normal büyüklükte bir balon gaz yasalarına istisnasız uyarken, bir avuç hava molekülüyle doldurabileceğiniz denli küçük, mikroskobik bir balon uymayacaktır. Çünkü sabit sıcaklıkta dahi bu bir avuç molekül ara sıra ve tamamen rastgele olarak birbirinden uzaklaşarak balonun şişmesine neden olacaktır. Benzer şekilde kimi zaman da salt moleküllerin hepsinin içeri doğru rastgele hareketinden ötürü büzülecektir. İşte bu yüzden de bu minicik balonun davranışı büyük ölçüde öngörülemezdir.

* Bu yasa $PV = nRT$ denklemiyle ifade edilir; n örnekteki gaz miktarı, R evrensel gaz sabiti, P basınç, V gazın hacmi, T ise sıcaklıktır.

Düzenliliğe ve büyük sayıların öngörülebilirliğine bağlı olma kavramına hayatın diğer alanlarından oldukça aşinayız aslında. Mesela, Amerikalılar Kanadalılara göre daha fazla beyzbol oynarken Kanadalılar daha çok buz hokeyi oynar. Bu istatistiksel "yasa"ya dayanarak, her iki ülke için farklı tahminler yürütebiliriz; örneğin, Amerika'nın Kanada'ya oranla daha fazla beyzbol topu, Kanada'nınsa Amerika'ya göre daha fazla hokey sopası ithal ettiği gibi. Fakat bu istatistiksel yasalar nüfusu milyonları bulan ülkelere uygulandığında bir öngörü değeri taşısa da, Minnesota ya da Saskatchewan'daki küçük bir kasabadaki hokey sopası veya beyzbol topu ticaretini kesin olarak öngöremez.

Schrödinger, klasik fiziğin istatistiksel yasalarına mikroskobik düzeyde güvenilemeyeceğini söylemekle kalmadı; bu yasalardan olan sapma boyutunun, ilgili parçacık sayısının kareköküyle ters orantılı olduğunu hesaplayarak öngörme gücündeki azalmayı nicelleştirdi. Buna göre bir trilyon (milyon kere milyon) parçacıkla dolu bir balon gaz yasalarından yalnızca milyonda bir sapma gösterir. Buna karşılık sadece yüz parçacıkla dolu bir balon kurallı davranıştan onda bir oranında sapar. Böyle bir balon her ne kadar ısıtıldığında şişip, soğutulduğunda sönse de, herhangi bir deterministik kanunla net ifade edilebilecek bir şekilde yapmaz bunu. Klasik fiziğin bütün istatistiksel kanunları bu sınırlamaya tabidir: çok çok fazla sayıda parçacık içeren cisimler için doğru olsalar da, az sayıda parçacık içeren cisimlerin davranışını tanımlayamazlar. Dolayısıyla güvenilirlik ve düzenlilik açısından klasik kanunlara tabi olan herhangi bir şeyin çok çok fazla sayıda parçacık içermesi gerekir.

Peki ya yaşam? Yaşamın kurallı davranışı, örneğin kalıtım yasaları, istatistiksel kanunlarla belirlenebilir mi? Schrödinger bu soru üzerinde düşününce, termodinamiğin altında yatan "düzensizlikten doğan düzen" ilkesinin yaşam üzerindeki hâkim güç olamayacağı sonucuna vardı çünkü onun da fark ettiği gibi, en minicik biyolojik makinelerin hiç değilse bir kısmı klasik yasaların işleyemeyeceği kadar küçüktür.

Sözgelimi, Schrödinger *What Is Life?* adlı kitabını yazdığı dönemde –o zamanlar kalıtımın genler tarafından yönetildiği bilindiği halde, genlerin yapısı hâlâ gizemini koruyordu– şu basit soruyu sordu: Genler, çoğalmaya ilişkin hatasızlığın istatistiksel "düzensizlikten doğan düzen" yasalarından köken almasına olanak tanıyacak denli büyük müdür? Tek bir genin, kenarı yaklaşık 300 angström (bir angström 0,0000001 milimetredir) uzunluğundaki bir küpten daha büyük olamayacağını tahmin etti. Böyle bir küpte yaklaşık bir milyon atom bulunması beklenir. Bu size çok fazla gibi gelebilir ama bir milyonun karekökü bindir, dolayısıyla kalıtımda hata düzeyi ya da "gürültü" binde bir ya da yüzde 0,1 düzeyinde olmalıdır. Öyleyse, kalıtım eğer klasik istatistiksel kanunlara dayanıyorsa, binde bir düzeyinde hata (yasalardan sapma) oluşabilmelidir. Oysaki genlerin milyarda birden daha düşük mutasyon oranları (hatalar) ile aslına sadık biçimde aktarılabildiği biliniyordu. Kalıtımın bu olağanüstü sadakat derecesi Schrödinger'i, kalıtım yasalarının klasik "düzensizlikten doğan düzen" yasaları üzerine kurulu olamayacağına ikna etmişti. Bunun üzerine, genlerin daha çok, kendisinin de kurulmasında rol oynadığı kuantum mekaniğinin klasik dışı ama tuhaf biçimde düzenli kurallarına tabi olan tekil atomlara ya da moleküllere benzediğini ileri sürdü. Schrödinger, kalıtımın yeni ortaya attığı "düzenden doğan düzen" ilkesine dayalı olduğunu ileri sürüyordu.

Kuramını ilk olarak 1943'te Dublin'deki Trinity College'da bir dizi konferansta sundu; ertesi yıl yayımlanan *What is Life?* adlı kitabında şöyle diyordu: "Canlı organizma, davranışı kısmen, sıcaklık mutlak sıfıra yaklaşıp moleküler düzensizlik bertaraf edildiğinde bütün sistemlerin gösterme eğiliminde olduğu . . . davranışa yaklaşan makroskobik bir sistem gibi görünüyor." Pek yakında anlayacağımız nedenlerden ötürü, mutlak sıfır derecede bütün cisimler termodinamik yasalarından çok kuantum yasalarına tabidir. Schrödinger'in iddiasına göre yaşam, havada uçmayı, iki ya da dört ayak üzerinde yürümeyi, okyanusta yüzmeyi, toprakta büyümeyi,

hatta bu kitabı okumayı mümkün kılan kuantum düzeyinde bir fenomendir.

Yabancılaşma

Schrödinger'in kitabının yayımlanmasını izleyen yıllar DNA çift sarmalının keşfine ve kuantum fenomeniyle pek ilişkilendirilmeyen bir disiplin olan moleküler biyolojinin yükselişine tanık oldu. Gen klonlaması, genetik mühendisliği, genom parmak izi ve genom dizilemesini geliştiren biyologlar, kısmen haklı gerekçelerle, matematiksel açıdan zorlu kuantum dünyasını göz ardı etmekten genel anlamda memnunlardı. Biyoloji ile kuantum mekaniği arasındaki sınır bölgesine zaman zaman giriş çıkışlar oluyordu gerçi. Ama bilim insanlarının çoğu, Schrödinger'in cesur iddiasını unutmuştu; hatta birçoğu, yaşamın ancak kuantum mekaniğiyle açıklanabileceği fikrine açıkça düşmanlık besliyordu. Örneğin, 1962'de İngiliz kimyacı ve bilişsel bilimci Christopher Longuet-Higgins şöyle yazmıştı:

> Birkaç yıl önce enzimlerle substratları arasındaki uzun menzilli kuantum mekaniği kuvvetleri olasılığıyla ilgili bazı tartışmalar olduğunu hatırlıyorum. Ancak sadece deneysel kanıtlar zayıf olduğu için değil, aynı zamanda böyle bir fikri moleküller arası kuvvetler kuramıyla uzlaştırmak zor olduğundan, böyle bir hipoteze temkinli yaklaşmak kesinlikle doğru olmuştur.[4]

1993 yılında, Schrödinger'in sunumundan elli sonra, Dublin'de düzenlenen bir toplantıya katılan bilim insanlarının yazdığı makaleleri bir araya getiren *What is Life? The Next Fifty Years* [Yaşam Nedir? Elli Yıl Sonra] adlı kitap[5] yayımlandığında dahi kuantum mekaniğinden pek bahsedilmiyordu.

O dönemde Schrödinger'in iddiasının şüpheyle karşılanmasının kökeninde büyük oranda, hassas kuantum durumunun, canlı

organizmalardaki sıcak, nemli ve çok hareketli moleküler ortamlarda varlığını sürdüremeyeceği inanışı yatıyordu. Geçen bölümde gördüğümüz gibi, pek çok bilim insanının, kuş pusulasının kuantum mekaniği tarafından kontrol edildiği fikrine çok şüpheci yaklaşmış ve yaklaşıyor olmasının temel nedeni budur. Bu konuyu tartıştığımız birinci bölümden hatırlayacağınız üzere, büyük cisimlerde moleküllerin rastgele düzenlenmesi maddenin kuantum özelliklerini "siler süpürür." Termodinamik anlayışımız sayesinde artık bu kuantum özellik kaybının neden kaynaklandığını anlayabiliriz: Schrödinger'in "düzensizlikten doğan düzen"e dair istatistiksel kanunların kaynağı olarak tanımladığı şey, bilardo topu benzeri moleküler itiş kakıştır. Dağınık parçacıklar, derinde yatan gizli kuantum özellikleri ortaya çıkaracak şekilde yeniden düzenlenebilir ama bu sadece özel koşullarda ve genellikle çok kısa bir süreliğine gerçekleşir. Mesela vücudumuzdaki dağınık halde dönüp duran hidrojen çekirdeklerinin, spinin kuantum özelliğinden ötürü *uyumlu* ("coherent") bir MRG sinyali oluşturacak şekilde nasıl hizaya girebildiğini gördük. Fakat bu, ancak büyük ve güçlü bir mıknatıs tarafından üretilen çok güçlü bir manyetik alan uygulandığında oluşan ve ancak bu manyetik kuvvet devam ettiği sürece korunabilen bir durumdur; manyetik alan ortadan kalktığı anda parçacıklar yeniden moleküler itişmelerle gelişigüzel dizilir, kuantum sinyaliyse dağılır ve saptanamaz hale gelir. Gelişigüzel moleküler hareketin itinayla düzenlenmiş kuantum mekaniği sistemlerini bozduğu, *uyumsuzluk* ("decoherence") adı verilen bu süreç, büyük cansız cisimlerdeki tuhaf kuantum etkilerini hızla ortadan kaldırır.

Vücut sıcaklığının artması, moleküler itiş kakışın enerjisini ve hızını artırdığı için uyumsuzluk daha yüksek sıcaklıklarda daha kolay gelişir. Ama "daha yüksek" sıcaklığı gerçekten sıcak olarak düşünmeyin. Aslına bakılırsa, oda sıcaklığında dahi uyumsuzluk neredeyse ânında gelişir. Hassas kuantum durumunun canlıların bedenindeki iç ortam sıcaklığında korunmasının, en azından başlangıçta, inanılması güç olarak değerlendirilmesinin ardında yatan

neden de buydu zaten. Gelişigüzel moleküler hareketin tamamen durmasıyla uyumsuzluğun bertaraf edilmesi ancak cisimler mutlak sıfır dereceye kadar (−273°C) soğutulduğunda mümkün olur, böylece kuantum mekaniği ışıl ışıl parlayarak kendini belli eder. Schrödinger'in yukarıda alıntıladığımız ifadesinin ne anlama geldiği bu noktada açıklığa kavuşuyor. Fizikçi, yaşamın her nasılsa, normalde canlı bir organizmanın sıcaklığından 273°C daha soğuk ortamda işleyen bir kurallar kitabına göre işlediğini iddia ediyordu.

Fakat gerek Jordan gerekse Schrödinger, kitabın ilerleyen bölümlerinde göreceğiniz gibi yaşamın cansız nesnelerden farklı olduğunu, çünkü bir genin ya da kuş pusulasının yapısında bulunan nispeten az sayıdaki düzenli parçacığın, bütün bir organizma açısından fark yaratabileceğini savunuyordu. Jordan'ın amplifikasyon, Schrödinger'inse düzenden doğan düzen terimiyle kast ettiği buydu. Göz renginiz, burnunuzun biçimi, kişilik özellikleriniz, zekâ düzeyiniz, hatta hastalıklara karşı yatkınlığınız, bunların hepsi yüksek derecede düzenli yapılar olan kırk altı süpermolekül, yani anne babanızdan size aktarılan, DNA'dan yapılmış kromozomlar tarafından belirlenmiştir. Evrenin bilinen kesiminde cansız makroskobik tek bir nesne yoktur ki, en temel düzeyde (klasik kanunlar yerine kuantum mekaniğinin hüküm sürdüğü düzey) maddenin detaylı yapısında böylesine bir hassasiyet göstersin. Schrödinger, yaşamı böylesine özel kılan şeyin bu olduğunu söylüyordu. Schrödinger'in ilk kitabının yayımlanmasının üzerinden yetmiş yıl geçtikten sonra, onun "Yaşam nedir?" sorusuna verdiği sıradışı yanıtın doğurduğu şaşırtıcı sonuçların kıymetini yeni yeni anlamaya başlıyoruz.

3
Yaşamın motorları

Canlıların yaptığı her şey atomların titreyiş ve kıpırdanışlarına dayanarak anlaşılabilir...

Richard Feynman[1]

Hamlet: Bir adam toprakta ne kadar kalır çürümeden?
Mezarcı: Ölmeden çürümemişse, –ki öyleleri geliyor son zamanlarda, frengi tutar yerlerini bırakmamış gömülecek,– öylesi değilse, sekiz dokuz yıl kalabilir. Bir debbağ dokuz yıl dayanır.
Hamlet: O neden daha çok dayanıyor?
Mezarcı: Neden olacak, derisi bu işte öyle tabaklanıyor ki su sızdırmıyor kolay kolay. Canına yandığımın adam ölüsünü çürütmek için de sudan beteri yoktur.

William Shakespeare
Hamlet, V. Perde, 1. Sahne, "Bir Mezarlık"*

Altmış sekiz milyon yıl önce, geç Kretase adını verdiğimiz dönemde, genç bir Tyrannosaurus rex seyrek ağaçlı bir nehir vadisinden yarı tropikal bir ormanın içlerine doğru ilerliyordu. Yaklaşık on sekiz yaşındaki hayvan henüz olgunluk çağına erişmediği

* Sabahattin Eyüboğlu çevirisi, İş Kültür Yayınları, 2016 *(ç.n.)*

halde boyu neredeyse 5 metreydi. Attığı her hantal adımla tonlarca dinozor etini, yoluna çıkan bahtsız ağaçları ya da kendinden küçük yaratıkları dümdüz etmeye yeten bir momentumla taşıyordu. Maruz kaldığı parçalayıcı kuvvetlere rağmen vücudunun bütünlüğünü koruyabilmesini sağlayansa, her bir kemiğinin, kiriş ve kasının *kollajen* olarak bilinen bir proteinden meydana gelmiş dayanıklı ama elastik lifler sayesinde yerli yerinde tutulmasıydı. Bu protein, eti bağlayan bir tür tutkal gibi işlev görür ve bizimki de dahil bütün hayvanların vücudunun vazgeçilmez bir bileşenidir. Bütün biyomoleküller gibi kollajen de, bilinen evrendeki en çarpıcı makineler tarafından yapılır ve yıkılır. Bu bölümde, bu biyolojik nanomakinelerin* nasıl çalıştığına odaklanacağız; sonra da bu yaşam makinelerinin çarklarıyla manivelalarının kuantum dünyasının derinliklerine dalarak biz dahil bütün organizmaların canlılığını sürdürmesini nasıl sağladığına ilişkin yeni bulguları inceleyeceğiz.

Ama önce, şu kadim vadiye geri dönelim. Tam o günde, dinozorun milyonlarca nanomakineden oluşan kütlesi onun felaketi olacaktı çünkü daha önceleri avını kovalamak ve parçalamak için etkili biçimde kullandığı uzuvları, o gün içine düştüğü nehir yatağının vıcık vıcık çamurundan kurtulmasında pek işine yaramayacaktı. Saatler süren nafile çabaların ardından Tyrannosaurus'un devasa ağzı çamurlu sularla doldu ve can çekişen hayvan bataklığa gömüldü. Hayvanın etinin çoğu durumda Hamlet'teki mezarcının sözünü ettiği cesetler misali hızla çürümesi beklenirken, bu dinozor çamura o kadar hızlı gömüldü ki, bütün vücudu kısa sürede, eti koruyan kıvamlı çamur ve kum karışımıyla kaplandı. Yıllar, yüzyıllar içinde ince taneli mineraller hayvanın kemikleriyle etindeki boşluklara, deliklere sızarak dokularını taşlaştırdı ve dinozorun cesedi giderek bir dinozor fosiline dönüştü. Yüzeydeyse arazinin içinden akmaya devam eden nehrin taşıdığı kum, çamur ve alüvyon tabakaları üst üste birikerek fosili onlarca metre kumtaşı ve killi şistin altına gömdü.

* "Nano" bir nanometre, yani bir metrenin milyarda biri ölçeğindeki yapıları tarif etmektedir.

Yaklaşık kırk milyon yıl sonra iklim ısındı, nehirler kurudu, uzun zaman önce ölmüş olan hayvan kemiklerinin üzerini örten kayaç tabakaları sıcak çöl rüzgârlarının etkisiyle erozyona uğradı. İki ayaklı bir başka tür olan *Homo sapiens* vadiye girene kadar yirmi sekiz milyon yıl daha geçti, fakat iki ayağı üzerinde duran bu primatlar, düşmanlık saçan bu kurak araziden uzak durdular.

Daha yakın zamanlarda Avrupalı yerleşimciler yaşanması zor bu topraklara geldiklerinde bölgeye Badlands of Montana [Montana'nın Çorak Arazisi], kurumuş nehir yatağındaki vadiye ise Hell Creek [Cehennem Deresi] adını verdiler. 2002 yılında, ünlü fosil avcısı Jack Horner öncülüğünde bir paleontolog ekibi o bölgede kamp kurdu. Gruptaki paleontologlardan Bob Harmon, bir gün öğle yemeği sırasında, üzerindeki kayaçtan çıkıntı yapan büyük kemiği fark etti.

Sonraki üç yıl boyunca, Amerikan Ordusu Mühendisler Birliği'nin, çok sayıda doktora öğrencisinin katılımıyla ve bir helikopterle yürütülen çalışmada, hayvanın iskeletinin neredeyse yarısı, içine gömülü olduğu kayaçtan dikkatle kazılarak çıkarıldı ve MOR-1125 numaralı numune olarak Montana Bozeman'daki Rockies Müzesi'ne nakledildi. Dinozorun uyluk kemiğini vinçle helikoptere çekmek için ikiye ayırmaları gerekti ve bu işlem sırasında fosilleşmiş kemiğin bir parçası kırıldı. Jack Horner kemikten kopan parçaları, Kuzey Carolina Eyalet Üniversitesi'nde çalışan ve fosillerin kimyasal yapısıyla ilgilendiğini bildiği paleontolog meslektaşı Dr Marry Schweitzer'e verdi.

Schweitzer kutuyu açınca bir sürprizle karşılaştı. Baktığı ilk parçanın iç tarafında (kemik iliği boşluğu) son derede sıradışı görünümlü bir doku vardı. Kemiği, dış taraftaki sert minerallerin çözünmesi sağlayarak daha derindeki yapıları açığa çıkarmak için asit banyosuna yatırdı. Ancak fosili asit banyosunda kazara fazla uzun tuttu; kemiği çıkardığında minerallerin *hepsi* çözünmüştü. Schweitzer fosilin bütünüyle darmadağın olmasını bekliyordu ama o ve meslektaşları, geride esnek bir lifsi madde kaldığını gördüler

şaşkınlıkla; bu maddenin mikroskop altındaki görüntüsü günümüz kemiklerinde de gördüğümüz yumuşak dokuya çok benziyordu. Günümüz kemiklerinde olduğu gibi bu doku da uzun kan damarı, kan hücresi ve kollajen lif zincirleriyle, yani hantal hayvanı tek parça halinde tutan biyolojik tutkalla doluydu.

Yumuşak doku yapısının korunduğu fosillere nadir olmakla birlikte rastlanır. Kanada'nın Britanya Kolumbiyası eyaletindeki Rocky Dağları'nda 1910-1925 yıllarında bulunan Burgess Şisti fosillerinde, yaklaşık altı yüz yıl milyon önce Kambriyen denizlerinde yüzmüş hayvanların yumuşak dokularının bıraktığı, insanı hayrete düşürecek kadar detaylı izler korunmuştur; Almanya'nın Solnhofen taşocağında bulunan, yaklaşık yüz elli milyon yıl önce yaşamış, ünlü tüylü arkeopteriks fosili de öyledir. Alışılageldik yumuşak doku fosillerinde biyolojik dokunun *maddesi* değil, sadece *izi* korunur; ne var ki, Mary Schweitzer'in asit banyosunda kalan esnek madde görünüşe göre dinozora ait yumuşak dokuydu. Schweitzer bulgularını 2007'de *Science* dergisinde yayımlayınca,[2] makale başlangıçta şaşkınlık ve bir hayli şüpheyle karşılandı. Ancak biyomoleküllerin milyonlarca yıl boyunca zarar görmeden kalması hakikaten şaşırtıcı olmakla birlikte, bizi şu anda asıl ilgilendiren şey bu öyküde daha sonra neler olduğu. Schweitzer, lifsi yapıların gerçekten de kollajenden yapılmış olduğunu kanıtlamak için, önce günümüz kollajenine yapışan proteinlerin fosil kemiğindeki liflere de yapıştığını gösterdi. Yaptığı son bir testte, dinozor dokusunu, hayvan vücudunda kollajen liflerin yapımıyla yıkımından sorumlu pek çok biyomoleküler makineden biri olan *kollajenaz* enzimiyle karıştırdı. Altmış sekiz milyon yıldan beri sapasağlam kalmış olan kollajen zincirleri dakikalar içinde enzim tarafından parçalandı.

Enzimler yaşamın motorlarıdır. En aşina olduğumuz enzimler herhalde gündelik hayatta karşımıza çıkanlardır; mesela, leke çıkarmak için "biyolojik" deterjanlara katılan proteazlar, reçele kıvam vermek için katılan pektini parçalayan pektinaz ya da sütü pıhtılaştırma ve peynir yapımında kullanılan rennet. Midemizde

ve bağırsaklarımızdaki çeşitli enzimlerin yediklerimizi sindirmede oynadığı rolü de biliyor olabilirsiniz. Ancak bunlar, doğanın nanomakinelerinin etkisinin oldukça önemsiz örnekleridir. İlkel yerküre koşullarındaki organik çorbada ortaya çıkan ilk mikroplardan, Jura dönemi ormanlarında gümbür gümbür ayak sesleri duyulan dinozorlara ve günümüz canlılarına varana dek yaşam tüm varlığını her daim enzimlere borçludur. Vücudunuzdaki her hücre, biyomoleküllerin bir süreklilik içinde bir araya gelmesi ve geri dönüşümüyle seyreden, yaşam dediğimiz hareket halindeki sürecin devamlılığına yardımcı olan bu moleküler makinelerden yüzlercesini, hatta binlercesini barındırır.

Burada "yardım", enzimlerin işlevini tanımlayan anahtar sözcüktür: Enzimlerin işi, aksi takdirde çok yavaş ilerleyecek olan her türlü biyokimyasal tepkimeyi hızlandırmaktır (*katalizlemek*). Deterjanlara eklenen proteaz enzimleri, lekelerdeki proteinlerin parçalanmasını hızlandırır, pektinaz meyvedeki polisakkaritlerin parçalanmasını hızlandırır ve rennet enzimleri sütün pıhtılaşmasını hızlandırır. Benzer şekilde hücrelerimizdeki enzimler de *metabolizma*yı, yani hücrelerimizdeki trilyonlarca biyomolekülün bizi canlı tutmak için dur durak bilmeksizin trilyonlarca başka moleküle dönüşme sürecini hızlandırır.

Mary Schweitzer'in dinozor kemiklerine eklediği kollajenaz enzimi, hayvanların vücudundaki kollajen liflerini parçalamakla görevli bu biyomakinelerden sadece biridir. Enzimlerin sağladığı hızlanma oranı, kollajen liflerinin enzim yokken sindirilmesi için gereken süreyle (altmış sekiz milyon yıldan uzun olduğu açık), doğru enzim eklendiğinde gereken süreyi (yaklaşık otuz dakika) karşılaştırarak kabaca tahmin edilebilir ki bu örnekte, arada trilyon kat fark vardır.

Bu bölümde, kollajenaz gibi enzimlerin astronomik boyutlardaki bu hızlanmayı nasıl gerçekleştirebildiğini inceleyeceğiz. Son yılların sürprizlerinden biri, kuantum mekaniğinin, en azından bazı enzimlerin etkisinde kilit rol oynadığının anlaşılmış olmasıdır

ve enzimler, yaşamın merkezinde bulundukları için, kuantum biyolojisine yaptığımız yolculukta uğrayacağımız ilk durak olacaktır.

Enzimler: ölü ya da diri

Enzimler keşfedilip özellikleri belirlenmeden binlerce yıl önce günlük hayatta kullanılmaya başlanmıştır. Binlerce yıl önce atalarımız tahıl ya da üzüm suyuna maya* –yani mikrobik bir torba dolusu enzim– ekleyerek bira ve şarap yapabiliyordu.

Ayrıca sığır işkembesinden elde edilen özütün (rennet) sütün peynire dönüşümünü hızlandırdığını da biliyorlardı. Asırlar boyunca bu dönüştürücü özelliklerin, canlıyı (bu bölümün başlığında İncil'deki ifadeye yapılan göndermede olduğu şekliyle "diri"yi) ölüden ayıran dirimsellik ve değişim hızı bahşedilmiş canlı organizmaların taşıdığı yaşamsal güçlerden kaynaklandığına inanıldı.

1752'de René Descartes'ın mekanistik felsefesinden ilham alan Fransız bilim insanı René Antoine Ferchault de Réaumur, bu yaşamsal etkinliklerden birini, sindirimi araştırmak için dâhiyane bir deney tasarladı. O dönemde, hayvanların yediklerini sindirim organlarındaki karıştırma ve ezmeye bağlı mekanik süreçle sindirdiği düşünülüyordu. Bu kuram –René Descartes'ın önceki bölümde bahsettiğimiz, hayvanların salt birer makine olduğunu savunan bakış açısıyla uyumlu bir mekanik eylem olarak– taşlığında besinleri yumuşatmaya yaradığı düşünülen küçük taşlar bulunan kuşlar için özellikle uygun görünüyordu. Fakat yırtıcı kuşların, taşlığında sindirici taşlar bulunmadığı halde besinleri sindirebilmesi Réamur'ün kafasını kurcalıyordu. Evcil doğanını, üzerinde küçük delikler açtığı minik metal kapsüllere yerleştirilmiş et parçalarıyla besledi. Hayvanın dışkısıyla çıkan kapsülleri topladığında etin, metal tarafından korunmasına, dolayısıyla herhangi bir mekanik etkiye maruz kalma şansı olmamasına rağmen tamamen sindirildiğini

* Mayalar tek hücreli mantarlardır.

gördü. Descartes'ın çarkları, manivelaları ve öğütücülerinin, yaşamın dirimsel güçlerinden hiç değilse birinde yetersiz kaldığı apaçık ortadaydı.

Réamur'ün çalışmasından bir asır sonra bir başka Fransız bilim insanı, mikrobiyolojinin kurucusu ve kimyager Louis Pasteur, o zamana kadar "dirimsel kuvvetler"e atfedilen bir başka biyolojik dönüşümü, üzüm suyunun şaraba dönüşümünü inceledi. Fermantasyondaki dönüştürücü ilkenin, aslında maya endüstrisinde kullanılan "fermentler"de ya da ekmek yapımında kullanılan hamur mayasında bulunan canlı maya hücreleriyle ilişkili olduğunu gösterdi. "Enzim" (Yunancada "mayanın içindeki" anlamına gelir) terimi 1877'de Alman fizyolog Wilhelm Friedrich Kühne tarafından, canlı maya hücrelerindeki *hayati etkinliklerde*, hatta canlı dokudan çıkarılan maddelerin önayak olduğu dönüşümlerde rol oynayan etmenleri tanımlamak üzere kullanılmıştır.

Peki ama nedir bu enzim denen şey ve yaşamdaki dönüşümleri nasıl hızlandırır? Şimdi, bu bölümün başındaki öyküye, kollajenaz enzimine dönelim.

Enzimlere neden ihtiyacımız var ve iribaşlar kuyruğunu nasıl kaybeder?

Kollajen, insanlar dahil tüm hayvanlarda en bol bulunan proteindir. Dokularımız arasında bulunan, kas ve yumuşak dokuları bir arada tutan bir moleküler ipliktir. Bütün proteinler gibi kollajen de *amino asit* denen temel kimyasal yapıtaşlarından meydana gelir. Glisin, glutamin, lizin, sistein ve tirozin gibi kimileri eczanelerden satın aldığınız takviye ürünlerden tanıdık gelebilecek yirmi çeşit amino asit uç uca dizilerek zincirler oluşturur. Her bir amino asit molekülü, aralarındaki kimyasal bağlar sayesinde kendine özgü üç boyutlu bir biçimi olan, on ila elli civarında karbon, azot, oksijen, hidrojen ve bazen de kükürt atomu içerir.

Kendi üstüne katlanmış bu moleküler yapılardan yüzlercesi, ipe dizili boncuklar misali uç uca sıralanarak proteini meydana getirir. Yan yana iki boncuk birbirine *peptid bağı* ile bağlıdır; peptid bağı bir amino asitteki karbon atomunu diğerinin azot atomuna bağlar. Peptid bağları çok güçlüdür; nihayetinde, T. rex'in kollajen liflerini bir arada tutan bağlar altmış sekiz milyon yıl boyunca sağlam kalmıştır.

Kollajenin özellikle güçlü bir protein olması, dokularımızın biçim ve yapısının korunmasında içsel bir ağ sistemi olarak oynadığı rol açısından büyük önem taşır. Kollajen proteinleri üçlü iplikler halinde birbirine sarılır ve bunlar da kalın ipleri, yani *lif* dediğimiz yapıları oluşturmak üzere birbirine bağlanır. Bu lifler dokularımızdaki hücreleri birbirine diken bir iplik gibi davranır; kaslarımızı kemiklere bağlayan kirişlerde ve kemikler arasındaki bağlarda da bulunur. Liflerden oluşan bu yoğun ağ yapısı *hücre dışı matriks* olarak adlandırılır ve temelde yapısal bütünlüğümüzü sağlar.

Vejetaryen olmayanlar hücre dışı matrikse aşinadır; hazmı zor bir sosiste ya da bir et parçasında kıkırdaksı, ip gibi yapılar şeklinde karşınıza çıkmıştır. Aşçılar, saatlerce pişen güveçte dahi yumuşamayan bu sert lifsi yapının eriyip gitmediğini bilir. Ancak hücre dışı matriks her ne kadar sofrada hoş karşılanmasa da sofraya oturanların vücudundaki varlığı mutlak yaşamsaldır. Kollajen olmasaydı kemiklerimiz dağılır gider, kaslarımız kemiklerin üzerinden dökülür ve iç organlarımız jölemsi bir şeye dönüşürdü.

Bununla birlikte kemikleriniz, kaslarınız ya da yemeğinizdeki kollajen lifler parçalanamaz değildir. Lifleri güçlü asit ya da alkali içinde kaynattığınızda amino asit boncukları arasındaki peptid bağları eninde sonunda kırılır ve bu sert lifler çözünebilir jelatine, "marshmallow" ya da jöle yapımında kullanılan maddeye dönüşür. Sinemaseverler *Hayalet Avcıları* filminde New York sokaklarında lömbür lömbür, devasa beyaz cüssesi ve hantal yürüyüşüyle dehşet saçan Stay Puft Marshmallow Adam'ı hatırlayacaklardır. Fakat filmde Marshmallow Adam eritilip kremaya dönüştürülerek kolayca alt

edilebilmişti. Marshmallow Adam'ı T. rex'ten ayıran şey, kollajen lifleri oluşturan amino asit boncukları arasındaki peptid bağlarıdır. Dayanıklı kollajen lifler gerçek hayvanları dayanıklı kılar.

Bir hayvanın vücudunun çatısını, kollajen gibi uzun süre dayanabilen bir malzeme kullanarak çattığınızda ortaya bir sorun çıkıyor. Bir yeriniz kesildiğinde ya da bertildiğinde veya kolunuzu bacağınızı kırdığınızda neler olduğunu düşünün: Dokular tahrip olur, dokuyu içeriden destekleyen o lifli ağ örgüsü, yani hücre dışı matriks de zarar görür ya da parçalanır. Bir ev fırtınadan ya da depremden zarar gördüğünde, evi onarmaya başlamadan önce parçalanmış iskeletin çıkarılması gerekir. Benzer şekilde, hayvan vücudunda da hasar görmüş hücre dışı matriksin kollajenaz enzimi kullanılarak kesilip çıkarılması gerekir ki, doku başka bir enzim grubu tarafından onarılabilsin.

Daha da önemlisi, hayvan büyüdükçe hücre dışı matriksin sürekli olarak yeniden biçimlendirilmesi gerekir: Bir bebeğin vücudunu destekleyen iç iskelet, gövdesi çok daha büyük bir erişkin için yetersiz kalır. Bu sorun özellikle erişkin hayvanın genç hayvandan çok farklı olduğu amfibyumlarda hızlıca ortaya çıkar ve bu nedenle sorunun çözümü de son derece öğreticidir. En bilinen örnek amfibyumlardaki başkalaşım [metamorfoz], yani küresel yumurtadan çıkan iribaşın olgunlaşarak zıplayan bir kurbağaya dönüşmesidir. Güçlü arka bacaklarıyla bu tıknaz, kuyruksuz amfibyumların fosilleri, 200 milyon yıl öncesine, Sürüngenler Çağı olarak da bilinen Mezozoik Zaman ortalarına dek geriye giden Jura dönemi kayaçlarında bulunduğu gibi, Kretase dönemi kayaçlarında da bulunabilmektedir. O halde, daha sonra MOR-1125 adını alan dinozorun son nefesini verdiği Montana nehrinde kurbağalar da yüzüyordu anlaşılan. Fakat dinozorların tersine kurbağaların Kretase döneminde soyu tükenmemiştir ve bu hayvanlar göllerde, nehirlerde, bataklıklarda varlığını sürdürerek, kuşaklar boyunca öğrencilerin ve bilim insanlarının hayvan vücudunun biçimlenme ve yeniden biçimlenme yollarını anlamalarına yardımcı olmuştur.

Bir iribaşın kurbağaya dönüşümü hatırı sayılır derecede bir yıkım ve yeniden biçimlenme süreci gerektirir; sözgelimi, yeniden biçimlenme sırasında kuyruğun yavaş yavaş vücuda geri emilmesi ve dokuların geri dönüşüme girmesiyle kurbağanın yeni bacakları meydana gelir. Bütün bunlar, hayvanın kuyruğunu destekleyen kollajen esaslı hücre dışı matriksin, yeni gelişen bacaklarda tekrar bir araya gelmeden önce hızla parçalanmasını gerektirir. Ama Montana kayaçları altında geçen altmış sekiz milyon yılı unutmayın; kollajen lifler o kadar da kolay parçalanmaz. Kurbağanın başkalaşımı, kollajenin sadece inorganik süreçler yoluyla kimyasal yıkımına bağlı olsaydı çok uzun sürerdi. Bir hayvanın yapısındaki sert kirişleri sıcak asitte kaynatamayacağı gayet açık; dolayısıyla kollajen liflerin parçalanması için çok daha ılımlı bir yol olmalı.

İşte *kollajenaz* enzimi tam da burada devreye girer.

Peki ama kollajenaz ve diğer enzimler nasıl çalışır? Enzim etkinliğinin bir tür gizemli kuvvete bağlı olduğuna ilişkin dirimselci inanış, on dokuzuncu yüzyılın sonlarına kadar varlığını sürdürdü. O dönemde, Kühne'nin meslektaşlarından kimyager Eduard Buchner, maya hücrelerinden elde edilen cansız özütlerin, canlı hücreler tarafından gerçekleştirilen dönüşümlerin aynını uyarabildiğini gösterdi. Buchner, *dirimsel kuvvet* denen şeyin aslında bir kimyasal *kataliz* biçiminden ibaret olduğunu savunan devrimsel görüşünü ileri sürdü.

Olağan kimyasal tepkimeleri hızlandıran maddeler olan katalizörler, on dokuzuncu yüzyıl kimyagerleri tarafından zaten biliniyordu. Aslına bakılırsa, sanayi devriminde rol oynayan kimyasal işlemlerin pek çoğu temelde katalizörlere dayanıyordu. Örneğin; sülfürik asit gerek sanayi gerekse tarım devriminde itici güç olmuş, demir-çelik imalatı, tekstil sanayisi ve fosfat gübresi üretiminde kullanılmış bir maddedir. Kükürt dioksit (SO_2) ve oksijenin (*reaktanlar*), suyla tepkimeye girmesi sonucu *ürün* olarak sülfürik asit (H_2SO_4) açığa çıkar. Ancak bu tepkime çok yavaş olduğu için ticari alanda kullanımı zordu. İngiltere'nin Bristol kentinde bir sirke

imalatçısı olan Peregrine Phillips 1831'de kükürt dioksit ile oksijeni, *katalizör* işlevi gören sıcak platinden geçirerek tepkimeyi hızlandırmanın bir yolunu buldu.

Katalizörler, tepkimeye katılmaksızın ya da değişmeksizin tepkime hızını artırdıkları için reaktanlardan (tepkimeye katılan maddeler) farklıdır. O nedenle, Buchner'in iddiası enzimlerin, Phillips'in keşfettiği türde inorganik katalizörden esasen farklı olmadığı yönündeydi.

Yıllarca süren biyokimyasal araştırmalar Buchner'in görüşlerini büyük oranda doğruladı. Saflaştırılan ilk enzim, buzağı midesinden elde edilen rennetti. Eski Mısırlılar sütü buzağı midesinin iç zarından yapılmış torbalarda saklarlardı; bu malzemenin sütün daha uzun süre saklanabilen peynire dönüşümünü hızlandırdığını bulanların da Mısırlılar olduğu düşünülmektedir. Bu uygulama on dokuzuncu yüzyılın sonuna kadar devam etti. O zaman artık buzağı mideleri kurutulup eczanelerde "rennet" olarak satılıyordu. 1874 yılında Danimarkalı kimyager Christian Hansen, iş görüşmesine gittiği bir eczanede, bir düzine rennet siparişinin geldiğine kulak misafiri olup bunların ne mene bir şey olduğunu sordu ve kimya becerilerini kullanarak, bu denli nahoş olmayan bir rennet kaynağı üretmeyi düşündü. Laboratuvarına döndü, buzağı işkembesinin sulandırılmasıyla elde edilen bu berbat kokulu sıvıyı kurutup toz haline getirmek için bir yöntem geliştirdi; Dr Hansen'in Rennet Özütü adıyla satışa çıkan ürün ona bir servet kazandırdı.

Rennet aslında farklı enzimlerden oluşmuş bir karışımdır; bunlardan peynir yapımında en aktif olanı, *proteazlar* denen ve proteinlerin parçalanmasını hızlandıran geniş enzim ailesinin bir üyesi olan *kimozin*dir. Kimozinin peynir yapımındaki etkisi, sütün pıhtılaşmasını sağlamaktır, böylece teleme ile peyniraltı suyu birbirinden ayrılabilir; fakat kimozinin buzağı vücudundaki işlevi, hayvanın içtiği sütün kesilmesini ve böylece sindirim kanalında daha uzun süre kalmasını sağlamak, dolayısıyla emilimi için ona daha uzun

süre tanımaktır. Bir başka proteaz olan kollajenazı saflaştırma yöntemi ise ancak elli yıl sonra Boston'da, Harvard Tıp Fakültesi'nde klinik bilimler alanında çalışan Jerome Gross'un 1950'lerde, iribaşların kurbağaya dönüşürken kuyruklarının nasıl olup da vücuda massedildiği sorusunu sormasının ardından geliştirilebildi.

Gross, kollajen liflerin rolüyle "yaşamın büyük sırrının saklı olduğuna" inandığı, moleküllerin kendi kendini monte etme sürecinin ["self-assembly"] bir örneği olarak ilgileniyordu.[3] Boğa kurbağasının, kuyruğu birkaç santime kadar uzayabilen iribaşı üzerinde çalışmaya karar verdi. Gross kuyruğun geri emilim sürecinin, hayvanın kollajen liflerinde epeyce bir düzenlenme ve dağılma gerektireceğine dair isabetli bir tahmin yürüttü. Kollajenaz etkinliğini saptamak için, bu dayanıklı, sağlam liflerle tıka basa dolu, süt görünümlü kollajen jelle doldurduğu bir Petri kabında uygulanan basit bir test geliştirdi. İribaş kuyruklarından aldığı doku parçalarını jelin yüzeyine yerleştirdiğinde, dokunun etrafında, bu dayanıklı liflerin parçalanarak çözünebilir jelatine dönüştüğü bir alan oluştuğunu fark etti. Ardından, kollajeni parçalayan maddeyi, yani kollajenaz enzimini saflaştırdı.

Kollajenaz, kurbağaların ve Cehennem Deresi'nde kemiklerini bırakan dinozor dahil diğer bütün hayvanların dokularında bulunur. Bu enzim, bugünkü işlevinin aynını altmış sekiz milyon yıl önce de yerine getiriyor, kollajen liflerini parçalıyordu. Fakat hayvan ölüp bataklığa gömülünce enzim etkinliğini yitirdiği için kollajen lifler bütünlüğünü korumuştu; ta ki Mary Schweitzer kemik parçalarının bulunduğu ortama taze kollajenaz ekleyene dek.

Kollajenaz, bütün hayvanların, mikropların ve bitkilerin neredeyse bütün hayati etkinlikleri gerçekleştirmek için bel bağladığı milyonlarca enzimden sadece biridir. Diğer enzimler hücre dışı matriksteki kollajen liflerini yapar; başkaları proteinler, DNA, yağlar ve karbonhidratlar gibi biyomoleküllerin yapımında rol oynarken, bambaşka bir grup enzim bu biyomoleküllerin parçalanmasını

ve geri dönüşümünü sağlar. Sindirim, solunum, fotosentez ve metabolizmada hep enzimler görev alır. Bizi yapan, bizi canlı tutan enzimlerdir. Onlar yaşamın motorlarıdır.

Peki ama enzimler, sülfürik asit ve tonlarca başka endüstriyel kimyasalın yapımında kullanılan kimyanın aynını gerçekleştiren biyolojik katalizörler midir sadece? Birkaç on yıl önce biyologların çoğu, yaşam kimyasının bir kimyasal tesiste, hatta bir çocuğun kimya deney setinde olup biten işlemlerden hiçbir farkı olmadığı konusunda Buchner ile hemfikir olabilirdi. Ancak son yirmi otuz yılda kilit öneme sahip bir dizi deney, enzimlerin nasıl çalıştığına dair yeni bir bakış açısı getirince bu görüş kökten değişime uğradı. Görünüşe göre yaşamın katalizörleri basit ve eski klasik kimyaya göre gerçekliğin çok daha derinlerine inebiliyor ve zekice bazı kuantum hilelerine başvurabiliyor.

Ancak yaşamın dirimselliğinde kuantum mekaniğinin neden gerekli olduğunu anlamak için önce çok daha sıradan endüstriyel katalizörlerin nasıl çalıştığına bir bakalım.

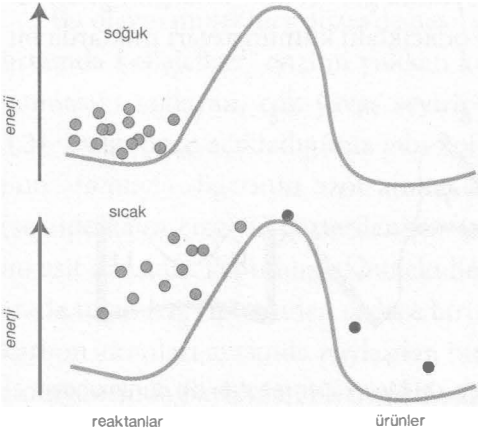
Enerji profilini değiştirmek

Katalizörler farklı mekanizmalarla çalışır ama bu mekanizmaların çoğu, katalizörlerin tepkimeleri nasıl hızlandırdığına basit bir açıklama sunan *geçiş durumu kuramı* (GDK)[4] yoluyla anlaşılabilir. GDK'yi anlamak için meseleye önce başka bir taraftan bakıp, tepkimeleri hızlandırmak için *neden* katalizörlere gereksinim olduğunu düşünmekte fayda var. Bunun nedeni, yaşadığımız ortamdaki kimyasal maddelerin çoğunun oldukça kararlı olması, yani tepkimeye girmeye elverişli olmamasıdır. Bu maddeler ne kendiliğinden parçalanır ne de diğer kimyasallarla reaksiyona girer; zaten aksi olsaydı, bugün ortamda bu kadar yaygın bulunmazlardı.

Yaygın kimyasalların kararlı olmasının nedeni, yapılarındaki bağların, madde içinde her zaman olan kaçınılmaz moleküler türbülans tarafından genellikle parçalanamamasıdır. Önündeki engelleri

aşması gereken reaktan moleküllerini, kendisi ile dönüşeceği ürünler arasındaki tepeleri tırmanırken gözümüzde canlandırabiliriz (şekil 3.1). "Yokuş yukarı" tırmanmak için gereken enerji çoğunlukla, atomların ve moleküllerin hızını artırarak daha süratli hareket etmelerine ya da titreşmelerine olanak tanıyan ısı tarafından sağlanır. Bu moleküler çarpışma ve itişme, moleküllerin yapısındaki atomları bir arada tutan kimyasal bağları kırabileceği gibi, yeni bağların oluşmasını da sağlayabilir. Fakat daha kararlı moleküllerin atomları –ki yaşadığımız çevrede yaygın olarak bulunan bunlardır– etraftaki moleküler türbülansa direnç gösterebilecek denli güçlü bağlarla bir arada tutulur. Yani çevremizdeki kimyasal maddelerin yaygın olmasının nedeni, ortamdaki yüksek enerjili moleküler itiş kakışa rağmen, bu maddelerin moleküllerinin büyük ölçüde kararlı olmasıdır.*

Ancak kararlı moleküller bile yeterli enerji verildiğinde birbirinden ayrılabilir. Olası enerji kaynaklarından biri, moleküllerin hareketini artıran daha fazla ısıdır. Bir kimyasalı ısıttığınızda, yapısındaki bağlar eninde sonunda kırılır. Yiyeceklerimizin çoğunu



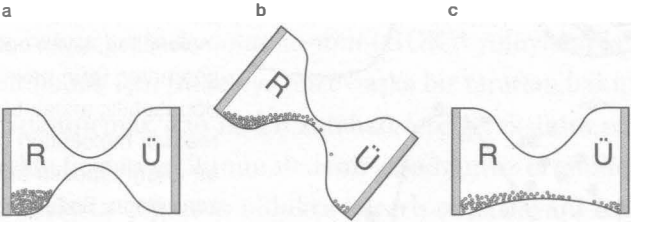
Şekil 3.1: Gri noktalarla gösterilen reaktan molekülleri, siyah noktalarla gösterilen ürün moleküllerine dönüşebilir, ancak bunun için reaktan molekülleri öncelikle bir enerji tepesini tırmanmak zorundadır. Soğuk moleküller bu çıkışı yapabilmek için nadiren yeterli enerjiye sahip olabilirse de sıcak moleküller zirveye kolayca çıkıverir.

* Elbette çok önemli bazı istisnalar vardır; mesela reaktif olduğu halde, gezegenimizde gerçekleşen süreçlerle devamlı ikmali yapılan ve özellikle bitkiler tarafından atmosfere sürekli boca edilen oksijen böyle belli başlı istisnalardan biridir.

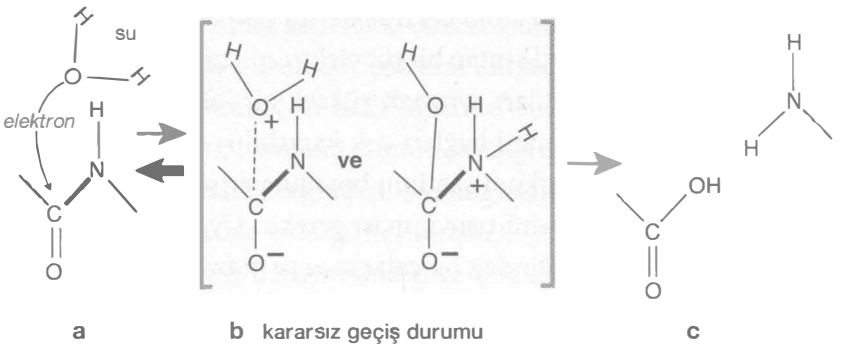
pişirmemizin nedeni de budur: Isı yemeğin içindeki çiğ maddelerin, yani reaktanların daha lezzetli ürünlere dönüşümünden sorumlu kimyasal tepkimeleri hızlandırır.

Isının kimyasal tepkimeleri nasıl hızlandırdığını gözünüzde canlandırmak için reaktan moleküllerini yan yatmış bir kum saatinin solundaki cam haznenin içinde bulunan kum taneleri olarak düşünün (şekil 3.2a). Kendi haline bırakılırsa, kum taneleri sonsuza kadar olduğu yerde kalır çünkü tanecikler kum saatinin boynuna ulaşıp, tepkimenin nihai ürünlerini temsil eden sağdaki odacığa geçmeye yetecek enerjiye sahip değildir. Kimyasal bir işlemdeki reaktan moleküllerini ısıtarak onların enerjisini artırabilir, dolayısıyla daha hızlı hareket edip titreşmelerini sağlayabilir ve bazı moleküllerin ürüne dönüşmesine yetecek enerjiyi temin edebilirsiniz. Bunu basitçe gözünüzde canlandırmak için kum saatini şöyle kuvvetlice salladığınızı düşünün; bu durumda kum tanelerinin bir kısmı sağ taraftaki odacığa geçerek ürüne dönüşecektir (şekil 3.2b).

Reaktanları ürüne dönüştürmenin bir başka yolu, moleküllerin aşması gereken enerji engelini aşağıya çekmektir. İşte katalizörler bunu yapar. Kum saatinin boynunu genişletmeye karşılık gelen bir işlev üstlenerek, sol taraftaki odacıktaki kumun asgari miktarda bir



Şekil 3.2: Enerji profilini değiştirmek. (a) Moleküller reaktan (R) durumundan ürün (Ü) durumuna geçebilmek için öncelikle geçiş durumuna (kum saatinin boynu) ulaşabilmelerini sağlayacak yeterli enerjiye sahip olmalıdır. (b) Kum saatini çevirmek reaktanı (substrat) ürüne göre daha yüksek enerji seviyesine çıkararak kolayca akıvermesini sağlar. (c) Enzimler geçiş durumunu kararlı hale getirerek çalışır, bunun için geçiş durumunun enerjisini (kum saatinin boynu) düşürerek substratların ürüne daha kolay dönüşmesine imkân tanır.



Şekil 3.3: Kollajen gibi proteinler (a) karbon (C), azot (N), oksijen (O) ve hidrojen (H) atomlarından meydana gelen ve peptid bağlarıyla birbirine bağlanan amino asit zincirlerinden oluşur. Şekilde peptid bağı kalın çizgiyle gösterilmiştir. Peptid bağı su (H_2O) molekülü tarafından *hidrolize* edilebilir, yani parçalanabilir (c) ama bunun için önce, karşılıklı olarak birbirine dönüşebilen en az iki farklı yapı içeren bir kararsız geçiş durumundan geçmelidir (b).

termal uyarılmayla sağ taraftaki odacığa akabilmesini sağlar (şekil 3.2c). Katalizörün enerji profilini değiştirebilme becerisi, substratların* ürüne çok daha hızlı dönüşmesini sağlayarak tepkimeyi büyük ölçüde hızlandırır.

Bu olayın moleküler düzeyde nasıl gerçekleştiğini anlamak için, ortamda kollajenaz** enzimi yokken kollajen molekülünün parçalanmasını sağlayan, çok yavaş seyirli tepkimeyi ele alalım (şekil 3.3). Daha önce açıkladığımız gibi kollajen, bir amino asidin karbon atomuyla diğerinin azot atomu arasında oluşan *peptid bağı* (şekilde kalın çizgiyle gösterilen) ile birbirine bağlanmış bir amino asit dizisidir. Peptid bağı, moleküllerin yapısındaki atomları bir arada tutan bağ tiplerinden sadece birisidir. Bu bağ aslında azot ile karbon atomları arasında paylaşılan bir çift elektrondan oluşur. İki atom arasında paylaşılan bu negatif yüklü elektronlar, bağın her iki

* Tepkimeye giren kimyasala reaktan denir; ancak tepkime enzim gibi bir katalizör yardımıyla gerçekleşiyorsa tepkimeye giren kimyasal madde substrat olarak adlandırılır.

** Çoğu enzimin adı tepkimeye giren ve tepkimede tüketilen molekülün, yani "substrat"ın adıyla başlar ve –az ekiyle sonlanır; örneğin kollajenaz, kollajen üzerinde etki gösteren bir enzimdir.

yanındaki pozitif yüklü atom çekirdeklerini çekerek, atomları peptid bağı yoluyla bir arada tutan bir tür elektronik tutkal işlevi görür.*

Paylaşılan elektronları ayırmak yüksek bir "aktivasyon enerjisi" gerektirdiği için peptid bağları çok kararlıdır; dolayısıyla bağın tepkimeyi temsil eden kum saatinin boynuna erişebilmesi için çok yüksek bir enerji tepesini tırmanması gerekir. Uygulamada peptid bağı genellikle kendiliğinden parçalanmaz ve *hidroliz* denen süreçle etraftaki su moleküllerinin birinden yardım alır. Bu olayın gerçekleşmesi için su molekülünün öncelikle peptid bağına yeterince yaklaşarak, elektronlarından birini bağın yapısındaki karbon atomuna vermesi, yeni oluşan ve şekil 3.3'te noktalı çizgiyle gösterilen bu zayıf bağ aracılığıyla su molekülünün yerinde tutulması gerekir. Bu ara evreye geçiş durumu denir (*geçiş durumu kuramı*nın adı buradan gelir); kum saatinin boynuyla temsil edilen bu evre, bağın parçalanması için tırmanılması gereken enerji tepesinin kararsız zirvesidir. Şekilde görüldüğü gibi, suyun verdiği elektron, peptid bağının yanındaki oksijene ulaşır ve oksijen atomu bu fazladan elektrondan ötürü negatif yüklenir. Bu sırada, elektronunu veren su molekülüyse geçiş durumunda pozitif yüklenmiş olur.

Bu noktada süreç biraz daha karmaşık hale gelir. Bu su molekülünü (H_2O), bir elektron kaybettiği için değil, artık çıplak bir hidrojen çekirdeği, yani şekilde + işaretiyle gösterilen bir proton taşıdığı için pozitif yüklü olarak düşünün. Pozitif yüklü bu proton, su molekülü içinde artık o kadar da güçlü bir biçimde yerinde tutulamaz ve geçen bölümde üzerinde durduğumuz kuantum mekaniği anlamında *yersizleşir*. Çoğu zaman su molekülüyle ilişkili olmasına rağmen (şekil 3.3b'de sol taraftaki yapı), kimi zaman ondan uzaklaşarak, peptid bağının diğer ucundaki azot atomuna yakın olarak bulunur (şekil 3.3b'nin ortasında, sağ taraftaki yapı). Başıboş gezen proton, bu konumdayken, peptid bağındaki elektronlardan birini çekip onu yerinden etmek suretiyle bağın kırılmasına yol açar.

* Bu tür bağlara kovalan bağ denir.

Ama bütün bunlar genellikle olmaz. Çünkü şekil 3.3b'de gösterilene benzer geçiş durumları çok kısa ömürlüdür; o kadar kararsız durumlardır ki bunlar, en hafif "dürtme" bile taşları yerinden oynatabilir. Örneğin; su molekülünün verdiği negatif yüklü elektron kolayca geri alınabileceğinden başlangıçtaki reaktanlar yeniden oluşur (şekilde kalın okla gösterilmiştir). Bu olay, bağın kopması sonucu tepkimenin ilerlemesine göre çok daha olası bir senaryodur. Yani peptid bağları genellikle kopmaz. Aslında, asit ya da alkali olmayan nötr çözeltilerde, peptid bağlarının yarısının parçalanması için gereken ve tepkimenin yarılanma ömrü olarak bilinen süre 500 yıldan uzundur.

Süreç, ortamda enzimler elbette *yokken* böyle işler. Artık enzimin hidroliz sürecine nasıl yardımcı olduğunu açıklayabiliriz. Geçiş durumu kuramına göre katalizörler, peptid bağının kırılması gibi kimyasal olayları, geçiş durumunu daha kararlı hale getirerek, dolayısıyla nihai ürünlerin oluşma şansını artırarak hızlandırır. Bu, çeşitli biçimlerde gerçekleşebilir. Örneğin; bağın yakınındaki pozitif yüklü bir metal atomu, geçiş durumunda negatif yüklü oksijen atomunu nötrleştirerek onu kararlı hale getirir (böylece oksijen atomu, su molekülünün verdiği elektronu iade etmek için aceleci davranmaz). Katalizörler, geçiş durumlarını kararlı hale getirmek suretiyle kum saatinin boynunu genişletmeye eşdeğer bir işlev üstelenerek sürece katkıda bulunur.

Şimdi de, kum saati benzetmesinden yola çıkarak anlattığımız geçiş durumu kuramının, enzimlerin yaşam için gerekli diğer bütün tepkimelerin hızlanmasını açıklayıp açıklayamadığına bir bakalım.

Titreyiş ve kıpırdanış

Mary Schweitzer'in antik Tyrannosaurus'a ait kollajen liflerini parçalamak için kullandığı kollajenaz enzimi, Jerome Gross'un kurbağalarda bulduğu enzimin aynısıdır. Hatırlayacaksınız, bu enzim iribaşın hücre dışı matriksinin parçalanması, böylelikle hücrelerin ve

biyomoleküllerin yeniden organize olarak erişkin kurbağayı oluşturması için gerekliydi. Enzim bir zamanlar dinozorda da aynı işlevi görmüştü, şimdi bizim vücudumuzda da aynı işlevi görüyor; yani gelişme sırasında ve doku hasarı sonrasında büyümeyi ve dokunun yeniden oluşumunu sağlayabilmek için kollajen liflerini parçalıyor. Bu enzimatik sürecin işleyişini anlamak için, Richard Feynman'ın 1959 yılında Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde yaptığı, bilim alanında dönüşüm yaratan "Dipte Epey Yer Var" başlıklı konuşmasından fikir alacağız. Bu konuşmanın genelde, atom ve molekül ölçeğinde mühendislik olarak tanımlayabileceğimiz nanoteknolojinin entelektüel temeli olduğu düşünülür. Feynman'ın fikirlerinin, *Fantastik Yolculuk* adlı 1966 yapımı filme de ilham verdiği söylenir; filmde bir bilim insanının beynindeki ölümcül pıhtıyı bulup tedavi edecek ekip, içinde bulunduğu denizaltıyla birlikte küçültülüp vücuduna enjekte edilir. Biz de olan biteni anlamak için hayalî nanodenizaltımızla bir yolculuğa çıkacağız. Hedefimizse iribaşın kuyruğu olacak.

Önce iribaşımızı bulmalıyız. Yakındaki bir göletten bir öbek kurbağa yumurtası buluyoruz ve ortası siyah benekli jölemsi kürelerin birkaç tanesini alıp onları bir akvaryuma dikkatlice yerleştiriyoruz. Çok geçmeden yumurtaların içinde bir kıpırdanma dikkatimizi çekiyor ve birkaç gün içinde yumurtalardan minik iribaşlar çıkıyor. Bir büyüteç yardımıyla belli başlı özelliklerini hemen ayırt edebiliriz: nispeten büyük bir kafa, küçük bir ağzın üzerinde bir burun, iki yanda birer göz, güçlü ve uzun kuyruk yüzgecinin önünde tüysü solungaçlar. Ardından iribaşlara yeterli besin (suyosunları) verip günlük gözlemlere devam ediyoruz. Haftalar boyunca hayvanın biçiminde dikkatimizi çeken fazla bir değişim olmasa da boyutlarında çarpıcı bir artış izliyoruz. Yaklaşık sekizinci haftaya ulaştığımızda, hayvanın solungaçlarının içeri çekilmiş, ön uzuvlarının ortaya çıkmış olduğunu görüyoruz. İki hafta daha geçince güçlü kuvvetli kuyruğunun tabanından arka bacakları çıkıyor. Bu aşamada, başkalaşım geçiren hayvandaki değişim ivme kazandığı

için gözlemlerimizi sıklaştırmalıyız. İribaşın solungaçları ve solungaç yarıkları tamamen kayboluyor, gözleriyse yukarıya, başının üst tarafına doğru yer değiştiriyor. İribaşın ön tarafında bu çarpıcı değişiklikler olup biterken, kuyruğu küçülmeye başlıyor. İşte beklediğimiz işaret geldi; artık nanodenizaltımıza atlayıp akvaryuma dalarak doğanın en dikkat çekici dönüşümlerden birini inceleyebiliriz.

Aracımız küçülürken kurbağanın başkalaşımını daha detaylı görebiliyoruz; mesela iribaşın kalınlaşıp pürüzlü hale gelen, karaya çıktığında onu nemli ve esnek tutacak mukus salgılayıcı bezlerden zenginleşen derisinde meydana gelen çarpıcı değişimi. Bizi hayvanın cildinden geçirecek o bezlerden birine doğru dalışa geçiyoruz. Kat kat hücre bariyerlerini aşıp dolaşım sistemine ulaşıyoruz. Hayvanın toplardamarlarıyla atardamarlarında seyrederken, vücudunda olup biten pek çok değişikliğe içeriden tanık olabiliriz. Kese benzeri yapılar akciğerlere dönüşüyor ve havayla dolup genişliyor. İribaşın, suyosunlarını sindirmeye uygun, sarmal biçimli uzun bağırsağı, yırtıcı bir hayvan için tipik olan düz bir bağırsak şeklini alıyor. Notokord (vücudu boyunca uzanan ilkel omurga yapısı) dahil yarı saydam kıkırdaksı iskelet, kıkırdağın yerini kemik dokusu aldıkça yoğun ve opak bir yapıya dönüşüyor. Keşif yolculuğumuza devam ederken, omurganın gelişimini ve iribaşın kuyruğunun, gelişmekte olan kurbağanın vücuduna massedilme sürecinin başlangıcını izliyoruz. Bu ölçekte, uzunlamasına, kalın, çizgili kas liflerini de görebiliriz.

Biraz daha küçülürsek her kas lifinin, aralıklı kasılmalarla iribaşın hareket etmesini sağlayan, silindirik hücrelerden oluşmuş uzun sütunlardan meydana geldiğini görebiliriz. Bu silindirlerin çevresini, araştırmamızın hedefi olan, halat benzeri yoğun ipsi yapılardan oluşmuş bir ağ, yani hücre dışı matriks sarar. Bu ipsi yapıların çözülmesiyle serbest kalan kıstırılmış kas hücrelerinin, iribaşın kaybolmakta olan kuyruğundan kurbağanın vücuduna geçmek üzere ayrılıp, gittikçe büyüyen hücre göçüne katılması matriksin sürekli bir değişim halinde görünmesine neden olur.

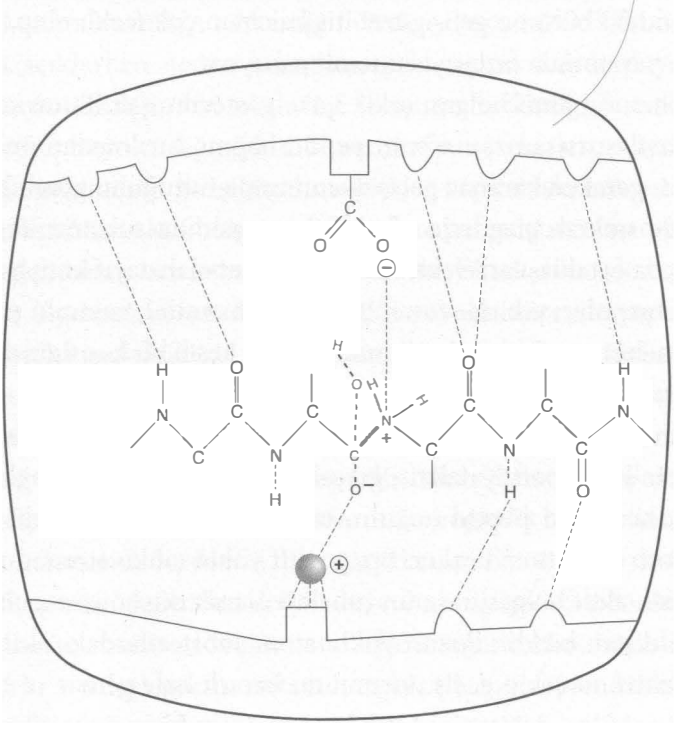
Biraz daha küçülerek, parçalanmakta olan hücre dışı matriksin içinde çözülen ipsi yapılardan birine odaklanırsak, bu yapının, her biri bir kollajen lif demetinden ibaret, protein yapılı binlerce kordondan örülmüş olduğu görürüz. Her lif, üç kollajen proteini zincirinden (daha önce dinozor kemiğinden söz ederken karşılaştığımız ipe dizili amino asit boncukları) meydana gelir. Fakat bu üç zincir birbiri etrafına sarılarak, DNA'yı andıran ama onun gibi çift sarmal değil de üçlü sarmal bir yapı oluşturur. Nihayet keşif gezimizin hedefini görüyoruz: kollajenaz enzimi. Bu molekül, kollajen lifinin üzerine bir istiridye gibi kapanır ve lif boyunca kayarak ilerler ve bu sırada üçlü sarmal yapıyı bir fermuar gibi açar, ardından da amino asitler arasındaki bağları keser. Milyonlarca yıl boyunca salim kalabilecek protein zincirini ânında parçalar. Şimdi bu kesme işleminin nasıl gerçekleştiğini daha kesin olarak görebilmek için ona biraz daha yakından bakacağız.

İyice küçülerek birkaç nanometre (milimetrenin milyonda biri) düzeyindeki moleküler ölçeğe iniyoruz. Bu ölçeğin ufacık boyutlarını kavramak zor; size daha iyi fikir vermesi için, bu sayfadaki "o" harfini ele alalım. Eğer normal boyutlarınızdan nanometre ölçeğine küçülseydiniz, o zaman sayfadaki "o" harfi kabaca Amerika Birleşik Devletleri'nin boyutlarına denk düşerdi. Bu ölçekte, hücrenin su molekülleri, metal iyonları* ve garip biçimli amino asitler dahil çeşitli biyomoleküllerle dolu olduğunu görebiliyoruz. Bu hareketli ve kalabalık moleküler havuz, dönüp duran, titreşen, geçen bölümde bahsettiğimiz bilardo masasındakine benzer bir hareketle birbiriyle çarpışıp seken moleküllerden ötürü sürekli bir çalkalanma ve türbülans halindedir.

Ve bütün bu gelişigüzel türbülanslı moleküler hareketliliğin arasında bu istiridye benzeri enzimler kollajen lifler boyunca kayarak çok farklı şekilde hareket eder. Bu ölçeğe dek küçüldüğümüzde, tek bir enzimi bir kollajen zincirini kırpa kırpa ilerlerken

* Elektriksel yük taşıyan bir atom ya da moleküle iyon denir; atom ya da molekül elektronunu kaybetmişse pozitif, elektron almışsa negatif iyona dönüşür.

görebiliriz. İlk bakışta enzim oldukça yamru yumru ve şekilsiz göründüğü için, belli bir düzen dahilinde olmaksızın bir araya gelmiş parçalardan oluştuğuna dair yanlış bir izlenime kapılabiliriz. Ama diğer bütün enzimler gibi kollajenazın da kesin bir yapısı vardır, her atom molekül içinde kendine özgü bir yere sahiptir. Etrafındaki moleküllerin gelişigüzel itiş kakışının tersine enzim kollajen life sarılarak zarif ve kesin bir moleküler dansla lifin sarmalını çözer ve zincir üzerinde iki amino asit arasındaki peptid bağını kestikten sonra sarıldığı yerden ayrılıp bir sonraki peptid bağına doğru ilerler. Bunlar moleküler düzeyde işleyişleri, gelişigüzel hareket eden trilyonlarca parçacığın bilardo topu benzeri kaotik hareketinden



Şekil 3.4: Kollajen yapısındaki peptid bağının (koyu renk) kollajenazın aktif bölgesi tarafından kırılması. Substratın geçiş durumu kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Aşağıda, merkezin solunda kalan küre, pozitif yüklü çinko iyonudur; üstteki karboksil grubu (COO) enzimin aktif bölgesindeki glutamat amino asidinden gelmektedir. Moleküler mesafeler ölçeğe uygun çizilmemiştir.

kaynaklanan insan yapımı makinelerin minyatür biçimleri değildir. Doğanın bu nanomakineleri, moleküler düzeyde, milyonlarca yıllık doğal seçilimin titiz mühendisliğinden maddenin temel parçacıklarının hareketini yönlendirmek için geçmiş ve koreografisi dikkatle planlanmış bir dans sergiler.

Söz konusu kesme işlemine daha yakından bakmak için enzimin, protein zincir ile tek bir su molekülünden oluşan substratları yerinde tutan çene benzeri yarığına giriyoruz. Burası enzimin *aktif bölgesi*, yani enerji kum saatinin boynunu eğip bükerek peptid bağlarının parçalanmasını hızlandıran işlevsel kısmı. Bu moleküler yönetim merkezinde gerçekleşen koreografi, dışarıda ve enzimin etrafındaki bütün o gelişigüzel itiş kakıştan çok farklı olup, kurbağanın yaşamında fazlasıyla önemli rol oynar.

Enzimin aktif bölgesi şekil 3.4'te gösterilmiştir. Bunu şekil 3.3 ile karşılaştırırsanız, enzimin peptid bağını, kırılmadan önce ulaşılması gereken kararsız geçiş durumunda tuttuğunu görebilirsiniz. Şekilde noktalı çizgilerle gösterilen ve aslında substrat ile enzim arasında ortaklaşılan elektronlardan ibaret olan zayıf kimyasal bağlar, substratları yerinde tutar. Böylece substratlar, enzimin moleküler çeneleri tarafından doğranmaya hazır kesin bir konfigürasyonda tutulur.

Enzim, çeneleri kapanırken bağı "ısırmak"tan çok daha incelikli bir şey yapar: Katalizin gerçekleşebileceği araçları sağlar. Yerleşen, hedefteki peptid bağının tam altında, pozitif yüklü büyük bir atom dikkatimizi çeker. Bu, pozitif yüklü çinko atomudur. Eğer enzimin aktif bölgesini onun çeneleri olarak düşünürsek, çinko iki kesici dişten biridir. Pozitif yüklü atom substratlardaki oksijenden bir elektronu çekip geçiş durumunu kararlı hale getirir ve böylece enerji profilini değiştirir. Artık kum saatinin boynu genişlemiştir.

İşin gerisini enzimin ikinci moleküler kesici dişi halleder. Bu kesici, enzimin kendi amino asitlerinden biri olan ve negatif yüklü oksijen atomu hedef peptid bağının üzerine gelecek şekilde konumlanan glutamattır. Görevi, ilk olarak bağlı su molekülünden

pozitif yüklü bir proton koparmaktır. Ardından bu protonu, hedefteki peptid bağının bir ucundaki azot atomuna aktararak ona bir pozitif yük kazandırır ki bu, peptid bağındaki elektronları çeker. Hatırlarsanız, elektronlar kimyasal bağların tutkalı gibiydi, dolayısıyla elektronu bağdan çekip çıkarmak, bir ek yerini bir arada tutan yapışkanı emerek çıkarmak gibidir, ek yerinin zayıflayıp kırılmasına neden olur.[5] Birkaç elektronun daha yeniden düzenlenmesinin ardından tepkimenin ürünleri olan kırık peptid zincirleri enzimin moleküler çenelerinden dışarı atılır. Aksi takdirde altmış sekiz milyon yıl sürecek olan bir tepkime nanosaniyeler içinde tamamlandı bile.

Peki ama kuantum mekaniği nerede sahneye çıkar? Enzim katalizini açıklarken neden kuantum mekaniğine ihtiyaç duyduğumuzu anlamak için, bir an durup kuantum mekaniği öncülerinin içgörüsüne başvuracağız yine. Koreografik hareketleri, içinde bulunduğu ortamdaki gelişigüzel moleküler itiş kakışla taban tabana zıt olan enzimin aktif bölgesindeki birkaç parçacığın oynadığı özel rolden daha önce bahsetmiştik. Buradaysa yüksek düzeyde yapılandırılmış biyomoleküller, kendileri gibi yüksek düzeyde yapılandırılmış başka moleküllerle çok özgül yollardan etkileşir. Gelişmekte olan kurbağanın organize dokularıyla hücrelerinden başlayarak, dokuları ve hücreleri bir arada tutan liflere, bu lifleri yeniden biçimlendiren ve böylelikle kurbağanın gelişimini etkileyen kollajenazın aktif bölgesindeki temel parçacıkların koreografik hareketine varana dek her aşama, Jordan'ın diktatöryal amplifikasyon ya da Erwin Schrödinger'in "düzenden doğan düzen" görüşüyle açıklanabilir. İster Jordan'ın modelini seçin, ister Schrödinger'inkini, burada olan bitenlerin trenleri yokuş yukarı iten kaotik moleküler hareketten çok farklı olduğu açık.

Peki ama bu moleküler düzen Schrödinger'in iddia ettiği gibi, yaşamda farklı bir kurallar silsilesinin geçerli olmasına olanak tanıyor mu? Bu soruya yanıt verebilmek için, çok küçük ölçekte işleyen o farklı kurallar silsilesini biraz daha iyi anlamamız gerek.

Geçiş durumu kuramı bütünüyle açıklıyor mu?

Bu tür koreografik moleküler hareketlerin ille de kuantum mekaniğiyle mi ilgili olması gerekir? Kollajenazın peptid bağlarını kırabilme becerisinin, kuantum mekaniğine başvurmaksızın, kimyagerlerin kimyasal tepkimeleri hızlandırmak için rutinde kullandığı katalitik mekanizmaları içerdiğini gördük. Örneğin; enzimin aktif bölgesindeki çinko atomu, Peregrine Phillips'in on dokuzuncu yüzyılda sülfürik asit üretimini hızlandırmak için kullandığı sıcak platin ile benzer rol oynuyor gibi görünmekte. Bu inorganik katalizörler, katalitik gruplarını substratlarına yaklaştırarak kimyasal tepkimeleri hızlandırmak için koreografik hareketlerden ziyade, gelişigüzel moleküler hareketlerle çalışır. Enzimatik kataliz, aktif bölgelere sınırlı, yaşam kıvılcımını çakan klasik birtakım katalitik mekanizmalardan mı ibarettir?

Yakın zamana kadar neredeyse bütün enzimbilimciler bu soruya evet yanıtını veriyordu; ara geçiş durumunun ömrünü uzatmaya yardımcı farklı süreçler olarak tanımlanan standart geçiş durumu kuramının enzimlerin nasıl çalıştığına dair en iyi açıklama olduğu düşünülüyordu. Fakat sürece katkısı olan bütün etkenler göz önüne alındığında bazı şüpheler belirdi. Örneğin; bu bölümün başlarında sözünü ettiğimiz peptid kesilmesi tepkimesini hızlandırabilen olası farklı mekanizmaların her biri iyi anlaşılmıştır ve bunların her biri tepkime hızını yaklaşık yüz kat artırır. Fakat bu faktörlerin hepsini birbiriyle çarpsanız dahi tepkime hızında en fazla bir milyon kat artış elde edebilirsiniz. Bu sayı, enzimlerin sağladığı türden bir hız artışının yanında pek önemsiz kalır; kuram ile gerçek arasında yüz kızartıcı bir uçurum görünmektedir.

Bir diğer bilmece de enzim aktivitesinin, enzimlerin kendi yapısında meydana gelen değişikliklerden nasıl etkilendiği meselesidir. Sözgelimi, bütün enzimler gibi kollajenaz da enzimin aktif bölgesindeki çeneleri ve dişleri destekleyen bir protein iskeletten oluşur. Bu çenelerle dişleri meydana getiren amino asitlerdeki bir

değişimin enzimin etkinliği üzerinde büyük etkisi olmasını bekleriz; gerçekten de öyledir. Daha şaşırtıcı olan, enzimin aktif bölgesinden uzaktaki amino asitleri değiştirmenin de enzimin etkinliği üzerinde çarpıcı etkiler göstermesidir. Enzimin yapısındaki, zararsız olması beklenen bu değişikliklerin niçin böylesine çarpıcı bir farklılık yarattığı konusu, standart geçiş kuramı açısından gizemini korumaktayken, işin içine kuantum mekaniği girdiğinde anlam kazanmaktadır. Bu keşfe kitabın son bölümünde tekrar döneceğiz.

Bir diğer sorun, geçiş durumu kuramının bugüne kadar, gerçek olanlar kadar iyi çalışan yapay enzimlerin geliştirilmesini sağlayamamış olmasıdır. Richard Feynman'ın ünlü sözünü hatırlayın: "Yaratamıyorsam anlamıyorumdur." Enzimler için de aynısı geçerli çünkü enzimlerin işleyiş mekanizmaları hakkında ne denli çok şey bilirsek bilelim, doğal enzimlerin sağladığı hız artışına benzer bir değişim gerçekleştirebilen herhangi bir enzimi sıfırdan tasarlamak bugüne kadar mümkün olmamıştır.[6] Feynman'ın ölçütlerine göre, enzimlerin nasıl çalıştığını hâlâ anlayabilmiş değiliz.

Ama şekil 3.4'e tekrar bakıp şu soruyu soralım: Enzim ne yapıyor? Yanıt oldukça açık: Enzimler molekül içi ve moleküller arası atomları, protonları ve elektronları manipüle eder. Bu bölümde şimdiye dek bu parçacıkların, top-çubuk modeli yapısındaki moleküllerde oradan oraya itilip çekilen elektrik yüklü minik kütleler gibi davrandığını düşündük. Ancak son bölümdeki incelemelerimizde gördüğümüz üzere elektronlar, protonlar, hatta atomlar, klasik toplardan çok farklıdır, çünkü bunlar normalde makroskobik düzeydeki bilardo toplarında uyumsuzluk tarafından filtrelenen, kuantum uyumuna dayanan tuhaf özellikler de dahil olmak üzere kuantum mekaniği kurallarına sıkı sıkıya bağlıdır. Nihayetinde bilardo topları, temel parçacıklar için iyi bir model değildir; o nedenle, enzimlerin aktif bölgelerinde gerçekten neler olup bittiğini anlayabilmek için klasik önyargılarımızdan sıyrılıp, cisimlerin ister iki isterse yüzlerce şeyi aynı anda yapabildiği, hayaletimsi bağlantılar gösterebildiği, görünürde nüfuz edilemeyen engellerin içinden

geçebildiği, velhasıl hiçbir bilardo topunun asla gerçekleştiremeyeceği pek çok şeyi yapabildiği kuantum mekaniğinin tuhaf dünyasına girmeliyiz.

Elektronları itip kakmak

Daha önce de gördüğümüz gibi, enzimlerin temel etkinliklerinden biri, elektronları substrat moleküllerinin etrafında hareket ettirmektir; örneğin kollajenaz, peptid molekülündeki elektronları çekip iter. Fakat elektronlar moleküllerin etrafında itilmenin yanı sıra, bir molekülden bir başkasına aktarılabilir de.

Kimyada elektron aktarımının çok yaygın rastlanan bir türü *oksidasyon* adı verilen işlemdir. Oksidasyon, kömür gibi karbon temelli yakıtları havayla temas halindeyken yaktığımızda gerçekleşen olaydır. Oksidasyonun esası, elektronların verici bir molekülden alıcı bir moleküle hareketidir. Kömürün yanması sırasında, karbon atomlarındaki yüksek enerjili elektronlar, oksijen atomlarında düşük enerjili bağlar oluşturmak üzere hareket ederken karbondioksit açığa çıkar. Enerji fazlası ise kömür ateşinin ısısı olarak dışarı verilir. Bu ısı enerjisini evimizi ısıtmak, yemeğimizi pişirmek, suyu buhara dönüştürerek bir motoru ya da elektrik üretmek amacıyla bir türbini harekete geçirmek için kullanırız. Ancak kömürün yanması ve içten yanmalı motorlar, elektron enerjisinden faydalanmak için fazlasıyla kaba ve verimsiz araçlardır. Doğa, çok uzun süre önce bu enerjiyi yakalamak için çok daha verimli bir yöntem geliştirmiştir: solunum.

Solunumun nefes alıp vermekle, yani gereksindiğimiz oksijeni ciğerlerimize çekmek ve sonra da karbondioksiti atık ürün olarak dışarı vermekle aynı şey olduğunu düşünürüz. Oysa gerçekte soluk alıp verme, bütün hücrelerimizde gerçekleşen çok daha karmaşık ve kurallı bir sürecin sadece ilk (oksijen alımı) ve son (karbondioksit atılımı) basamaklarıdır. Solunum, bizim daha büyük hücrelerimizin içinde kıstırılmış, kendi zarı, hatta kendi DNA'sı olan, bakteri

hücrelerine benzeyen *mitokondri* adlı karmaşık organellerde* gerçekleşir. Aslına bakılırsa, mitokondrilerin yüz milyonlarca yıl önce, hayvan ve bitki hücrelerinin atası olan hücrelerde kendine yer edinmiş bir simbiyotik bakteriden evrimleşmiş ve sonra bağımsız yaşayabilme becerisini yitirmiş olduğu neredeyse kesindir. Bununla birlikte, bu yapıların kökeninin bir zamanlar bağımsız yaşamış bir bakteri hücresine dayanması, nasıl olup da solunum gibi olağanüstü girift bir süreci gerçekleştirebildiklerini açıklayabilir. Gerçekten de kimyasal karmaşıklık açısından solunum, önümüzdeki bölümde göreceğimiz fotosentezin ardından ikinci sırada gelmektedir.

Kuantum mekaniğinin burada oynadığı role odaklanırken solunum sürecinin işleyişini basitleştirmemiz gerek. Kaldı ki ne kadar basitleştirirsek basitleştirelim, solunum bu biyolojik nanomakinelerin mucizesini mükemmelen yansıtan dikkate değer bir dizi işlemden oluşur. Solunum, karbon temelli bir yakıtın, bu örnekte gıdalarla aldığımız besin maddelerinin yanmasıyla başlar. Örneğin; karbonhidratlar bağırsaklarımızda glukoz gibi şekerlere parçalanır ve bunlar da kan akımına karışarak enerji açlığı çeken hücrelere ulaştırılır. Bu şeker yakıtını yakmak için gereken oksijen de akciğerlerden aynı hücrelere kan yoluyla ulaşır. Tıpkı kömürün yanmasında olduğu gibi, moleküldeki karbon atomlarının dış yörüngelerinde bulunan elektronlar, NADH denen bir moleküle aktarılır. Ancak bu elektronlar oksijen atomlarına bağlanmak üzere hemen kullanılmak yerine, hücrelerimizde enzimlerden oluşan bir *solunum zinciri* boyunca, bayrak yarışında bir koşucudan diğerine geçen bayrak misali, enzimden enzime aktarılır. Elektron, her aktarım basamağında daha düşük bir enerji seviyesine taşınır ve oluşan enerji farkı, protonları mitokondriden dışarı pompalayan enzimleri çalıştırmak için kullanılır. Mitokondrinin iç ve dış ortamları arasında meydana gelen proton gradyanı ise, ATP denen bir biyomolekülün yapımında kullanılan ATPaz adlı bir başka enzimin devri için kullanılır.

* İkinci bölümden hatırlayacağınız üzere organeller hücrelerin "organ"ları, yani solunum gibi belirli işlevleri gerçekleştiren yapılarıdır.

ATP, bütün canlı hücrelerde bir tür enerji bataryası gibi işlev gören ve vücudu hareket ettirmek ya da onarmak gibi enerji gerektiren pek çok olayda hücre içinde oradan oraya kolayca taşınabilen çok önemli bir moleküldür.

Elektron taşıma sistemiyle çalışan proton pompası enzimleri, suyu yokuş yukarı pompalayarak enerji fazlasını depolayan hidroelektrik pompalara benzer. Daha sonra suyun aşağıya doğru akmasına izin verildiğinde açığa çıkan enerji, elektrik enerjisi üreten bir türbin motorunu döndürür. Benzer şekilde solunum enzimleri de protonları mitokondri dışına pompalar. Protonlar tekrar içeriye akarken, türbin benzeri ATPaz enziminin devri için gereken enerjiyi sağlar. Bu devirler, yüksek enerjili bir fosfat grubunu enzim içindeki bir moleküle bağlayarak ATP yapımını sağlayan bir dizi başka koreografik moleküler hareketi yürütür.

Bu enerji yakalama süreci ile bayrak yarışı analojisini biraz daha genişletecek olursak, bayrak yerine bir şişe suyun (elektron enerjisini temsilen) elden ele geçirildiğini ve her koşucunun (enzim) şişeden bir yudum su içtiğini, şişede kalan suyun da sonunda oksijen denen kovaya boşaltıldığını hayal edebiliriz. Elektron enerjisinin bu şekilde azar azar zapt edilmesi, işlemin bütününü, enerjinin olduğu gibi doğrudan oksijene boşaltılmasından çok daha verimli kılar çünkü böylelikle çok küçük bir bölümü ısı enerjisi olarak kaybedilir.

O halde solunum sırasında gerçekleşen temel olayların aslında soluk alıp vermeyle pek alakası yoktur. Solunum, elektronların hücrelerimizdeki solunum enzimleri zincirinde düzenli aktarımıdır. Zincirdeki bir enzimle bir sonraki arasında gerçekleşen her elektron aktarımı, çok sayıda atomun doldurabileceği onlarca angströmlük mesafelerin aşılmasını gerektirir ve bu, alışılageldik elektron sıçramasıyla aşılabileceği düşünülen mesafenin çok üzerindedir. Solunum bilmecesinin gizemi, bu enzimlerin elektronları böylesine büyük moleküler boşluklardan nasıl olup da bu denli çabuk ve verimli şekilde kaydırabildiğidir.

Bu soruyu ilk kez 1940'larda Avusturya-Macaristan kökenli Amerikalı biyokimyacı Albert Szent-Györgyi sormuştur. 1937'de C vitamininin keşfiyle ilgili çalışmalarından ötürü Nobel Tıp Ödülü alan Szent-Györgyi, 1941 yılında yaptığı "Yeni Bir Biyokimyaya Doğru" başlıklı konuşmasında, elektronların biyomoleküllerden kolayca akışının, elektronikte kullanılan silisyum kristalleri gibi yarı-iletkenler içindeki hareketine benzer olduğunu ileri sürmüştür. Ne yazık ki, birkaç sene sonra proteinlerin aslında elektrik için zayıf iletkenler olduğu, dolayısıyla elektronların enzimler içinde Szent-Györgyi'nin öngördüğü biçimde kolayca akamayacağı anlaşılmıştır.

1950'li yıllarda kimya alanında önemli ilerlemeler kaydedildi. Kanadalı kimyacı Rudolph Marcus'un geliştirdiği, elektronların farklı atomlar ve moleküller arasında hareket etme ya da sıçrama hızını açıklayan ve onun adıyla anılan etkili kuram (Marcus kuramı) özellikle önemliydi. Marcus da 1992'de çalışmalarından ötürü kimya dalında Nobel Ödülü aldı.

Fakat yarım asır önce, özellikle solunum enzimlerinin, elektronların görece büyük moleküler mesafelerden böylesine hızlı aktarımını nasıl desteklediği hâlâ bir muammaydı. İleri sürülen görüşlerden biri, proteinlerin bir saatin dişli çark mekanizması gibi sırayla dönerek, birbirinden uzak molekülleri yakınlaştırdığı ve böylece elektronların moleküller arasında kolayca sıçrayabilmesini sağladığıydı. Bu modellerin önemli bir öngörüsü, düzeneği harekete geçirecek ısı enerjisinin daha az olduğu düşük sıcaklıklarda, işleyişin belirgin ölçüde yavaşlayacağı idi. Ne var ki 1966'da iki Amerikalı kimyacı, Don DeVault ve Britton Chance, Pennsylvania Üniversitesi'nde yaptıkları deneylerle, solunum enzimleri arasındaki elektron sıçramalarının, bütün beklentilerin tersine, düşük sıcaklıklarda yavaşlamadığını göstererek kuantum biyolojisi alanında gerçek anlamda çığır açtı.[7]

1915 Michigan doğumlu olan Don DeVault, Buhran Dönemi'nde ailesiyle batıya göç etmişti. Kaliforniya'daki Caltech ve Berkeley'de öğrenim görmüş, 1940 yılında kimya alanında

doktorasını tamamlamıştı. Aynı zamanda bir insan hakları aktivisti olan DeVault, İkinci Dünya Savaşı sırasında vicdani retçi olduğu için bir süre hapiste kaldı. 1958'de California Üniversitesi'ndeki kimya profesörlüğü görevinden istifa edip, Güney'deki ırk eşitliği ve bütünleşme mücadelesinde doğrudan rol almak üzere Georgia'ya taşındı. Davasına olan sarsılmaz inancı ve bağlılığı, pasif direnişçi olması onu siyahî aktivistlerle katıldığı yürüyüş eylemlerinde doğrudan fiziksel saldırı riskine maruz bırakıyordu. Bir keresinde, siyahîlerle beyazların katıldığı ortak bir eylemde saldırıya uğrayınca çenesi kırılmış ama bu bile onu yolundan döndürmemişti.

DeVault 1963 yılında, kendinden sadece iki yaş büyük olduğu halde alanının önde gelen bilim insanlarından biri olarak dünya çapında ün kazanmış olan Britton Chance ile çalışmak üzere Pennsylvania Üniversitesi'ne gitti. Chance bir değil, iki dalda doktora yapmıştı: biri fizikokimya, diğeriyse biyoloji. Dolayısıyla uzmanlık "alanı" çok geniş, araştırma konuları çok çeşitliydi. Meslek hayatının önemli bir bölümünü enzimlerin yapısı ve işlevi üzerinde çalışarak geçirmiş, bu arada 1952 Olimpiyat Oyunları'nda yelkencilik dalında Birleşik Devletler adına bir altın madalya kazanmıştı.

Britton Chance, ışığın, bir solunum enzimi olan sitokrom oksidazca oksijene elektron transferini hangi mekanizmayla desteklediği konusuna yoğun ilgi duyuyordu. Chance, Mitsuo Nishimura ile birlikte, *Chromatium vinosum* bakterisinde bu transferin, bakteriler sıvı azot içinde −190°C'ye kadar soğutulduğunda dahi gerçekleştiğini buldu.* Fakat altta yatan moleküler mekanizma açısından ipucu verebilecek olmakla birlikte bu işlemin sıcaklıkla nasıl bir değişim gösterdiği hâlâ bilinmiyordu. Chance, tepkimeyi çok kısa ama yoğun bir ışık parlamasıyla çok hızlı başlatmak gerektiğini fark etti. İşte Don DeVault'un uzmanlığı bu noktada devreye girdi. DeVault,

* Çoğu bilim insanı sıcaklık birimi olarak Kelvin (K) kullanır. Sıcaklıkta 1 K'lik değişim, 1°C'lik değişime karşılık gelir. Ancak Kelvin ölçeği −273°C'ye eşdeğer olan mutlak sıfır ile başlar. Örneğin; insanın vücut sıcaklığı 310 K'dir.

böyle kısa küreli ışık atımları yaratan bir lazer geliştiren küçük bir şirkete birkaç yıl boyunca danışmanlık yapmıştı.

DeVault ve Chance, solunum enzimleriyle dolu bakteri hücrelerine, yakut bir lazer kaynağından 30 nanosaniye (bir saniyenin milyarda otuzu) süreyle parlak kırmızı ışık ilettikleri bir deney tasarladılar. Sıcaklığı düşürdükçe, elektron transferi hızının azalarak 100 K (−173°C) civarında, oda sıcaklığındaki değerinin binde birine düştüğünü buldular. Elektron transferinin esas olarak ısı enerjisi miktarına bağlı olarak yürütülmesi halinde böyle olması beklenirdi zaten. Ancak DeVault ve Chance, sıcaklığı 100 K'in altında düşürünce garip bir şey oldu. Sıcaklık mutlak sıfırın 35 derece üstüne (−238°C) dek düşürüldüğü halde, elektron transfer hızı daha da azalacağına bir platoya ulaşarak sabit kaldı. Bu durum, elektron transferi mekanizmasının, sadece (daha önce bahsettiğimiz) "klasik" elektron sıçramasına bağlı olamayacağının bir işaretiydi. Görünüşe göre yanıt kuantum dünyasında, özellikle de birinci bölümde karşımıza çıkan kuantum tünelleme adlı tuhaf olayda gizlidir.

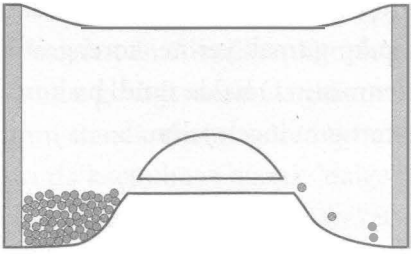
Kuantum tünelleme

Birinci bölümden hatırlayacağınız üzere kuantum tünelleme, parçacıkların, tıpkı duvardan geçen ses dalgaları gibi davranarak geçirgen olmayan engellerin içinden geçebilmesini sağlayan tuhaf kuantum olayıdır. İlk olarak 1926'da Alman fizikçi Friedrich Hund tarafından bulunmuş, çok geçmeden, o zamanlar yeni bir alan olan kuantum mekaniği matematiğini kullanan George Gamow, Ronald Gurney ve Edward Condon tarafından radyoaktif bozunma kavramını açıklamak için başarıyla kullanılmıştır. Kuantum tünelleme nükleer fiziğin temel özelliği haline gelmiş, ancak malzeme bilimi ve kimya alanında daha yaygın uygulama alanı bulan bir fenomen olduğu sonraları anlaşılmıştır. Daha önce de gördüğümüz gibi, kuantum tünelleme, güneşteki pozitif yüklü hidrojen çekirdeklerinin,

hidrojenin helyuma dönüşümünün ilk basamağında füzyona uğramasını ve güneşin muazzam bir enerji yaymasını sağladığından yeryüzündeki yaşam için elzemdir. Buna karşılık, kısa süre öncesine dek, kuantum tünellemenin yaşam süreçlerinde rol oynadığı düşünülmüyordu.

Kuantum tünellemeyi bir bakıma, parçacıkların bariyerin bir tarafından diğerine sağduyumuzun imkânsız olduğunu söylediği bir şekilde geçmesini sağlayan bir araç gibi düşünebiliriz. "Bariyer" derken kast ettiğimiz –yeterli enerji olmaksızın– fiziksel açıdan aşılamaz bir bölgedir; bilimkurgu öykülerindeki kuvvet alanlarını düşünün. Bu bölge, elektrik iletkenlerinin iki tarafını ayıran dar bir yalıtkan malzemeden, hatta solunum zincirindeki iki enzim arasında yer alan boşluk gibi sadece boş bir alandan da oluşabilir. Veya daha önce tarif ettiğimiz gibi, kimyasal tepkimelerin hızını sınırlayan bir tür enerji tepesi de olabilir (şekil 3.1). Küçük bir tepeye doğru yokuş yukarı vurulan bir top düşünün. Tepenin üst noktasına ulaşıp diğer taraftan aşağıya yuvarlanabilmesi için topa yeterince kuvvetli bir tekme savurmak gerekir. Yokuş yukarı giderken git gide yavaşlayacak ve yeterli enerji olmadığı (yeterince güçlü bir tekme atılmadığı) takdirde bir yerde durup, geldiği yoldan geri dönecektir. Klasik Newton mekaniğine göre topun bariyeri geçmesinin tek yolu, enerji tepesini aşabilecek enerjiye sahip olmasıdır. Ama örneğimizde top yerine bir elektron, tepe yerine ise itici bir enerji bariyeri olsaydı, o zaman elektronun alternatif ve daha verimli bir yolla bariyerden dalga özelliği göstererek geçmesi düşük de olsa ihtimal dahilinde olacaktı. İşte bu, kuantum tünellemedir (şekil 3.5).

Kuantum mekaniğinin önemli bir özelliği, bir parçacık ne kadar hafifse tünellemenin o kadar kolay olmasıdır. O nedenle, bu olayın atomaltı dünyada her an, her yerde gerçekleştiği anlaşılınca, en yaygın rastlanan tünellemenin, çok hafif elementer parçacıklar olan elektronlarda bulunmuş olması hiç de şaşırtıcı değil. Elektronların metallerden alan emisyonu ile ayrılmasının tünellemenin bir etkisi olduğu 1920'lerin sonlarında açıklığa kavuştu. Kuantum tünelleme



Şekil 3.5: Enerji profilinde kuantum tünelleme.

ayrıca radyoaktif bozunmanın nasıl gerçekleştiğini de açıklıyordu: Uranyum gibi bazı atomların çekirdekleri arada bir dışarı bir parçacık tükürüyordu. Kuantum mekaniğinin nükleer fizik problemlerindeki ilk başarılı uygulama alanı bu oldu. Günümüzde, kimyada elektronların, protonların (hidrojen çekirdekleri), hatta daha ağır atomların yaptığı kuantum tünelleme gayet iyi anlaşılmıştır.

Kuantum tünellemenin kritik bir özelliği, diğer pek çok kuantum fenomeninde olduğu gibi, parçacıkların dalga benzeri yayılma özelliğine bağlı olmasıdır. Fakat bir yapı tünelleme yapabilecek çok sayıda parçacıktan oluşuyorsa, bileşenlerin hepsi dalga özelliklerini, dalga tepe ve çukurlarının karşılıklı çakıştığı bir eşgüdümle korumak zorundadır ki biz buna sistemin uyumlu olması ya da basitçe ifade etmek gerekirse "ahenk içinde" işlemesi diyoruz. Uyumsuzluk ise, birçok kuantum dalgasının büyük bir hızla birbiriyle olan uyumu yitirmesi sonucu, herhangi bir genel uyumlu davranışı aşındırarak yapının kuantum tünelleme yetisini ortadan kaldırdığı süreci tarif eder. Bir parçacık kuantum tünelleme yapabilmek için, engelin içinden sızacak şekilde dalga özelliğini korumak zorundadır. Futbol topu gibi büyük cisimlerin kuantum tünelleme yapamamasının nedeni budur işte: Büyük cisimler eşgüdümlü ve uyumlu dalga benzeri davranış gösteremeyen trilyonlarca atomdan meydana gelir.

Kuantum standartlarına göre canlı hücreler de büyük cisimler olduğu için, atomları ve molekülleri büyük ölçüde uyumsuz hareket eden sıcak, ıslak hücre içi ortamda kuantum tünellemenin gerçekleşmesi ilk bakışta pek mümkün gözükmemektedir. Ama daha önce

de belirttiğimiz gibi, bir enzimin içyapısı daha farklıdır; içerdiği parçacıklar kaotik bir çılgınlığa kapılıp gitmek yerine, koreografik bir dans icra edecek şekilde düzenlenmiştir. O halde şimdi bu koreografinin yaşamda nasıl bir fark yarattığını inceleyelim.

Biyolojide elektronların kuantum tünelleme yapması

DeVault ile Chance'in 1966 tarihli deneyinde elde ettikleri beklenmeyen sıcaklık profilinin bütünüyle açıklanabilmesi yıllar aldı. Çalışmaları moleküler biyolojiden fizik ve bilgisayar bilimine uzanan pek çok disiplini kapsayan bir başka Amerikalı bilim insanı da John Hopfield'dır. En çok, bilgisayarla sinir ağları geliştirilmesine ilişkin çalışmalarıyla tanınan Hopfield, biyolojideki fiziksel süreçlere büyük ilgi duyuyordu. 1974'te, DeVault ve Chance'in sonuçlarını açıklamak üzere geliştirdiği kuramsal modelle ilgili olarak, "Isıyla etkinleşen tünelleme yoluyla biyolojik moleküller arasında elektron transferi" başlıklı makalesi yayımlandı.[8] Hopfield, yüksek sıcaklıklarda, moleküllerin titreşim enerjisinin, tünelleme olmaksızın elektronların bir bariyerden atlamasını sağlayabileceğine dikkat çekiyordu. Sıcaklık düştükçe, enzimatik tepkimenin gerçekleşmesine yetecek kadar titreşim enerjisi kalmayacaktı. Ancak DeVault ve Chance, tepkimenin düşük sıcaklıklarda da devam ettiğini bulmuştu. O nedenle Hopfield, elektronun düşük sıcaklıklarda enerji eğiminin ortasında bir yerlere kadar yukarı taşındığını ve bu noktada kat etmesi gereken mesafenin, eğimin dibindeyken aşması gereken mesafeden daha kısa olduğunu, bu durumun da bariyerden kuantum tünelleme yoluyla geçme şansını artırdığını ileri sürdü. Haklıydı da; tünelleme yoluyla elektron transferi, aynen DeVault ve Chance'in bulduğu gibi, çok düşük sıcaklıklarda da gerçekleşebilir.

Bugün artık elektronların solunum zincirinde kuantum tünellemeyle yolculuk ettiğinden şüphe duyan pek az bilim insanı var. Bu da, hayvanlarda ve fotosentez kullanmayan mikroorganizmalarda

(fotosentez kullananları bir sonraki bölümde ele alacağız) enerji kullanılan en önemli tepkimelerin kesinlikle kuantum biyolojisinin alanına girdiği anlamına geliyor. Fakat elektronlar, kuantum dünyasının standartlarına göre bile fazlasıyla hafif olduğundan davranışları da kaçınılmaz olarak "dalga benzeri"dir. O yüzden, elektronlar oradan oraya sıçrayarak hareket eden minik klasik parçacıklar gibi düşünülmemelidir ama işin aslı şu ki, standart biyokimya metinlerinin çoğu hâlâ "güneş sistemi" şeklindeki atom modelini esas alarak yazılmaktadır. Bir atomun yapısındaki elektronların çok daha uygun bir temsili, minik bir çekirdeğin çevresinde dalga dalga yayılan bir elektron bulutu, birinci bölümde sözünü ettiğimiz "olasılık bulutu"dur. O nedenle, ilk bölümde bahsettiğimiz duvardan geçen ses dalgalarına benzer şekilde, elektron dalgalarının da –biyolojik sistemlerde dahi– enerji engellerinin içinden geçebilmesi o kadar da şaşırtıcı olmayabilir.

Peki ama ya protonlar, hatta atomlar gibi daha büyük parçacıklar? Onlar da biyolojik sistemlerde tünelleme yapabilir mi? İlk bakışta yanıtın hayır olduğunu düşünebilirsiniz. Tek bir proton bile bir elektronun iki bin katı ağırlığındadır ve kuantum tünellemenin, parçacık büyüklüğüne karşı son derece hassas olduğu bilinen bir gerçektir. Küçük parçacıklarda tünelleme kolayca gerçekleştiği halde ağır parçacıklar, aşılacak mesafe çok kısa olmadığı takdirde, tünellemeye karşı çok daha dirençlidir. Ancak son zamanlarda yapılan kayda değer deneyler, bu görece büyük parçacıkların da enzimatik tepkimelerde kuantum tünelleme yapabildiğini göstermektedir.

Protonları hareket ettirmek

Hatırlarsanız, kollajenaz enziminin (şekil 3.4), elektron transferini desteklemenin yanı sıra bir diğer kritik etkinliği, protonları hareket ettirerek kollajen zincirinin kırılmasını sağlamaktı. Daha önce de değindiğimiz gibi bu tür bir tepkime, enzimler tarafından en sık gerçekleştirilen parçacık manipülasyonu numaralarından biridir.

Bütün enzim tepkimelerinin neredeyse üçte biri, bir hidrojen atomunun bir yerden başka bir yere taşınmasıyla ilgilidir. Burada kullandığımız "hidrojen atomu" teriminin birkaç farklı anlamı olabileceğine dikkat edin: Çekirdeği (bir proton) etrafında bir elektron içeren nötr bir hidrojen (H) atomu olabileceği gibi, elektronsuz bir proton, yani salt çekirdekten ibaret pozitif yüklü bir hidrojen iyonu (H^+), hatta fazladan bir elektronu olan bir hidrojen atomu (H^-) da olabilir.

Özsaygısı olan herhangi bir kimyacı ya da biyokimyacının da size söyleyeceği gibi, hidrojen atomlarının (yani protonların) moleküller içinde ya da arasında hareketi ille de bir kuantum etkisinin söz konusu olmasını gerektirmez ya da en azından, tünelleme gibi kuantum dünyasının nispeten tuhaf işlemlerini akla doğrudan getirmez. Gerçekten de, yaşamsal olayların sürüp gittiği sıcaklıklarda gerçekleşen kimyasal tepkimelerin çoğunda protonların bir molekülden diğerine büyük oranda kuantum dışı termal sıçrama yoluyla hareket ettiği düşünülmektedir. Ancak DeVault ve Chance'in elektron tünelleme için göstermiş olduğu gibi, sıcaklığa karşı görece kayıtsızlığıyla bilinen birkaç kimyasal tepkimede proton tünelleme rol oynar.

Yaşam, kuantum dünyası standartlarına kıyasla, yüksek sıcaklıklarda işler. Dolayısıyla, biyokimya tarihinin büyük bölümünde bilim insanları, protonların enzimatik transferinin tamamen, kuantum dışı bir mekanizma olan enerji engelinin üzerinden sıçrama aracılığıyla gerçekleştiğini varsaymışlardır.* Derken 1989 yılında Judith Klinman ve Berkeley'deki meslektaşları, enzim tepkimelerinde proton tünellemeye dair ilk doğrudan kanıtları elde etmiştir.[9] Klinman, proton tünellemenin yaşamın moleküler mekanizmasındaki önemini uzun zamandan beri savunan bir biyokimyacıdır. Hatta

* Madem öyle, güneşteki füzyon sürecini açıklamak için neden kuantum tünellemenin gerekli olduğunu merak edebilirsiniz. Fakat füzyon örneğinde, inanılmaz yüksek sıcaklık ve basınçlar bile, pozitif yüklü iki protonun füzyonunu engelleyen elektriksel itme gücünü aşmaya yetmez, dolayısıyla kuantum mekaniği füzyonu açıklamada bize yardım elini uzatır.

proton tünellemenin, biyolojinin bütünü içindeki en önemli ve sık rastlanan mekanizmalardan biri olduğunu iddia edecek kadar ileri gitmiştir. Klinman'ın büyük buluşu, maya hücrelerinde, bir alkol molekülünden bir başka küçük molekül olan NAD^+'ye proton aktararak NADH (nikotinamid adenin dinükleotid; hücredeki başlıca elektron taşıyıcısı olarak daha önce karşımıza çıkmıştı) oluşumunu sağlayan alkol dehidrogenaz (ADH) enzimiyle ilgili bir çalışmasına dayanmaktadır. Ekip, zekice bir teknik olan *kinetik izotop etkisi* yöntemiyle proton tünellemenin varlığını doğrulamıştır. Kimya alanında gayet iyi bilinen bu fikir, kuantum biyolojisiyle ilgili temel kanıtlardan birini sunduğu ve bu kitapta birkaç kez daha karşımıza çıkacağı için, burada daha etraflıca açıklanmayı hak ediyor.

Kinetik izotop etkisi

Bisikletle bir tepeyi tırmanmaya çalışırken yayaların sizi sollayıp geçtiği oldu mu hiç? Düz yolda giderken, yayaların hatta koşucuların yanından bisikletle zahmetsizce geçip gidersiniz; o halde, bisiklete binmek tepeyi tırmanırken neden o kadar da verimli bir iş değildir?

Diyelim ki seleden indiniz, bisiklet yanınızda düz yolda ya da yokuş yukarı yürüyorsunuz. Şimdi mesele açıklığa kavuştu. Yokuş yukarı tırmanırken sadece kendinizi değil bisikleti de itmeniz gerek. Düz yoldaki yatay hareket sırasında bisikletin ağırlığı o kadar da mühim olmadığı halde, yokuş tırmanırken aleyhinize çalışmaya başlar; bisikletin ağırlığını yerçekimine karşı metrelerce yukarı taşımanız gerekir. İşte bu yüzden yarış bisikleti imalatçıları, ürettikleri bisikletlerin hafif olmasına bu denli önem verir. Kuşkusuz, bir cismin ağırlığı onu hareket ettirme kolaylığı açısından büyük fark yaratır ama bisiklet örneğimiz bu farkın ne tür bir hareketten söz ettiğimize bağlı olduğunu gösterir.

Farz edelim, A ve B kasabaları arasındaki arazinin düz mü yoksa tepelik mi olduğunu anlamak istiyorsunuz ama iki kasaba

arasında bizzat seyahat edemiyorsunuz. Fakat kasabalar arasında, kimi hafif kimi ağır bisikletlerle çalışan postacıların hizmet verdiği bir posta servisi olduğunu fark ettiğinizde muhtemel bir strateji beliriyor. Arazinin düz mü yoksa tepelik mi olduğunu anlamak için, bir kasabadan diğerine, yarısını hafif bisiklet süren, diğer yarısını ağır bisiklet süren postacıların taşıyacağı, birbirinin aynı bir grup paket yollamanız yeterli. Eğer paketlerin hepsi yaklaşık olarak aynı sürede gideceği adrese varıyorsa, o zaman iki kasaba arasındaki arazinin hayli düz olduğu sonucuna varabilirsiniz; yok eğer ağır bisikletli postacıların taşıdığı paketlerin adrese varması çok daha uzun sürüyorsa, o zaman A kasabasıyla B kasabası arasındaki arazi muhtemelen tepeliktir. Bu durumda bisikletli postacılarınız, bilinmeyen araziyi araştıran sondalar gibi davranır.

Her kimyasal elementin atomları, tıpkı bisikletler gibi, farklı ağırlık gruplarına aittir. En basit ve bizi en fazla ilgilendiren atom olan hidrojeni ele alalım. Bir elementin ne olduğunu belirleyen, çekirdeğindeki protonların sayısıdır (ve aynı zamanda, çekirdeğin etrafında, protonlarla eşit sayıda bulunan elektronların sayısı). Hidrojen çekirdeğinde tek proton bulunur, helyum çekirdeğinde iki, lityum çekirdeğinde üç... ve böyle devam eder. Fakat atomun çekirdeği bir başka parçacık daha içerir. Bu parçacık, birinci bölümde, güneşte hidrojen çekirdeklerinin füzyonunu anlatırken karşımıza çıkan nötrondur. Çekirdeğe nötronların eklenmesi atomu ağırlaştırır ve bu nedenle onun fiziksel özelliklerini değiştirir. Bir elementin farklı sayıda nötrona sahip atomlarına onun *izotopları* denir. Hidrojenin normal izotopu, tek bir proton ve elektron içeren en hafif izotopudur. Hidrojenin en bol bulunan biçimi de budur. Ancak daha nadir rastlanmakla birlikte daha ağır izotopları da vardır: çekirdeğinde bir protona ek olarak bir nötron bulunan döteryum (D) ve iki nötron içeren trityum (T).

Elementlerin kimyasal özelliklerini büyük ölçüde atomlarının içerdiği elektron sayısı belirlediği için, aynı elementin çekirdeğinde farklı sayıda nötron bulunduran farklı izotoplarının kimyasal

yapısı eşdeğer olmasa bile çok benzerdir. Kinetik izotop etkisi, bir kimyasal tepkimenin, atomların hafif izotoplardan ağır izotoplara değişimine ne kadar duyarlı olduğunun ölçümüyle ilgili olup, ağır ve hafif izotoplarla gözlemlenen tepkime hızlarının oranı şeklinde tanımlanır. Örneğin; suyun dahil olduğu bir tepkimede, H_2O molekülündeki hidrojen atomlarının yerine daha ağır akrabaları olan döteryum ve trityum kullanılırsa D_2O ya da T_2O oluşur. Bisikletli postacılarımızda olduğu gibi tepkime, reaktanların ürünlere dönüşürken geçtiği yola bağlı olarak, atomların değişen ağırlığına duyarlı olabilir de olmayabilir de.

Önemli kinetik izotop etkilerinden sorumlu birkaç mekanizma vardır ve bunlardan biri de, tıpkı bisiklet sürme örneğinde olduğu gibi, parçacığın kütlesine son derece duyarlı olan kuantum tünellemedir. Kütleyi artırmak parçacığın davranışını daha az dalgabenzeri kılar ve böylece bir enerji bariyerinden sızma olasılığını düşürür. Dolayısıyla atomun kütlesini iki katına çıkarmak, mesela normal hidrojeni döteryumla değiştirmek, parçacığın kuantum tünelleme yapma ihtimalini birdenbire düşürür.

O nedenle, büyük bir kinetik izotop etkisinin varlığı, tepkime mekanizmasında –reaktanlarla ürünler arasındaki yolda– kuantum tünellemenin rolü olup olmadığına dair kanıt oluşturabilir. Ancak bu etki, kuantum dışı klasik kimyaya da atfedilebileceği için bizi kesin bir sonuca götürmez. Buna karşılık, eğer kuantum tünellemenin rolü varsa, o zaman tepkime sıcaklığa karşı özel bir yanıt vermelidir; bu durumda tepkime hızının, DeVault ve Chance'in elektron tünelleme için göstermiş olduğu gibi, düşük sıcaklıklarda plato çizmesi beklenir. Klinman ile ekibinin ADH enzimiyle ilgili bulduğu sonuç tam olarak buydu işte ve bu sonuç, tepkime mekanizmasında kuantum tünellemenin rol oynadığına dair güçlü bir kanıt sunuyordu.

Klinman'ın grubu, yaşamsal olayların gerçekleştiği sıcaklıklarda sürüp giden pek çok enzimatik tepkimede proton tünellemenin yaygın biçimde kullanıldığına ilişkin kuvvetli kanıtlar topladı. Manchester Üniversitesi'nden Nigel Scrutton'ın ekibi gibi başka

gruplar da başka enzimlerle yaptıkları benzer deneylerde, kuantum tünellemeye güçlü biçimde işaret eden kinetik izotop etkileri gösterdiler.[10] Yine de enzimlerin kuantum uyumunu nasıl koruyabildiği meselesi çok tartışmalı konudur. Enzimlerin durağan olmayıp, katıldıkları tepkimeler sırasında sürekli titreştikleri bir süreden beri biliniyor. Örneğin, kollajenaz enziminin *çeneleri* kollajen bağını kırarken her seferinde açılıp kapanır. Bunların tepkime mekanizmasının sonucu ortaya çıkan önemsiz hareketler olduğu ya da substratları yakalayarak tepkimenin bütün atomlarını hizaya sokmada rol oynadığı düşünülüyordu. Ancak günümüzde kuantum biyolojisi araştırmacıları, bu titreşimlerin, atomları ve molekülleri, parçacıkların (elektronlar ve protonlar) kuantum tünelleme yapabilmesini sağlayacak kadar yakınlaştıran "yürütücü hareketler" olduğunu iddia ediyorlar.[11] Kuantum biyolojisinin en heyecan verici ve hızlı gelişen alanlarından biri olan bu konuya kitabın son bölümünde geri döneceğiz.

Peki bu biyolojide kuantumun yerini sağlamlaştırır mı?

Enzimler, bugüne kadar yaşamış ve yaşamakta olan her canlı hücredeki her bir biyomolekülün yapımında ve yıkımında rol oynamıştır. Enzimler, yaşamın dirimsel etkenlerine her şeyden daha yakındır. Dolayısıyla bazı enzimlerin, hatta muhtemelen hepsinin, parçacıkların uzayın bir noktasında kaybolup ânında bir diğerinde ortaya çıkışını teşvik ettiğinin keşfedilmesi, yaşamın gizemiyle ilgili yeni bir kavrayış sağlamıştır. Her ne kadar enzimlerle ilgili daha iyi anlamamız gereken pek çok mesele –örneğin protein hareketlerinin rolü– henüz açıklığa kavuşmamış olsa da, kuantum tünellemenin enzimlerin işleyişindeki rolüne dair şüphe kalmamıştır.

Öyle bile olsa Klinman, Scrutton ve diğerlerinin bulgularını kabul etmekle birlikte, kuantum etkilerinin biyolojide, buharlı trenin çalışmasındakine benzer bir role sahip olduğunu iddia eden bilim

insanlarının yönelttiği eleştirilere de değinmek gerek: Kuantum etkileri hep vardır ama sistemin nasıl işlediğine dair anlayışımızla pek ilgileri yoktur. Bu görüş genellikle, enzimlerin tünelleme gibi kuantum fenomenlerinden faydalanmak için *evrimleşmiş* olup olmadığı tartışmasında yer bulur. Eleştiriyi getirenler, çoğu biyokimyasal tepkimenin atomik boyutları göz önüne alındığında, biyolojik süreçlerde kuantum fenomenlerinin zaten kaçınılmaz olduğunu savunmaktadır. Bir yere kadar haklı oldukları söylenebilir. Kuantum tünelleme sihir değildir; evrenin oluşumundan beri gerçekleşmektedir. Yaşamın "icat ettiği" bir numara olmadığı kesin. Bununla birlikte biz, canlı hücrelerin içindeki sıcak, ıslak ve hareketli koşullar düşünülürse, kuantum tünellemenin enzim aktivitesinde ortaya çıkmasının pek de kaçınılmaz olmadığını savunuyoruz.

Hatırlayacaksınız, canlı hücrelerin içi, son bölümde incelediğimiz, buharlı trenleri yokuş yukarı süren bilardo topu benzeri moleküler hareketi andıran sürekli bir çalkalanma ve türbülans halindeki karmaşık moleküllerle tıka basa dolu, olağanüstü kalabalık bir mekândır. Yine hatırlarsanız, hassas kuantum uyumunu dağıtan ve bozan, dolayısıyla günlük dünyanın gözümüze "normal" görünmesini sağlayan da bu gelişigüzel harekettir. Kuantum uyumunun bu moleküler türbülans ortamında hayatta kalması beklenmediği için, tünelleme gibi kuantum etkilerinin, canlı hücredeki böylesi bir moleküler çalkalanma denizinde devam ettiğinin keşfedilmiş olması son derece şaşırtıcıdır. Ne de olsa, topu topu on yıl önce bilim insanlarının çoğu, tünelleme ve diğer hassas kuantum fenomenlerinin biyolojide gerçekleşiyor olabileceği fikrini reddediyordu. Bu olayların bu tür habitatlarda saptanmış olması, yaşamın, *hücrelerin işleyişini sağlamak için*, kuantum dünyasının sağladığı avantajlardan yararlanabileceği özel birtakım önlemler aldığını düşündürmektedir. Evet ama hangi önlemler? Yaşam, kuantum davranışının düşmanı olan uyumsuzluğu uzak tutmayı nasıl başarır? Bu, kuantum biyolojisinin en büyük, ama son bölümde göreceğimiz gibi, yavaş yavaş aydınlığa kavuşmakta olan gizemlerinden biridir.

Fakat devam etmeden önce, nanodenizaltımızı bıraktığımız yere, iribaşın kaybolmakta olan kuyruğundaki kollajenaz enziminin aktif bölgesine geri dönmeliyiz. Çeneler tekrar açılırken aktif bölgeden çabucak çıkıyoruz; böylece kollajen zinciri (ve de nanodenizaltımız!) serbest kalıyor; zincirdeki bir sonraki peptid bağını kesmek üzere olan istiridye benzeri enzimi geride bırakıyoruz. Ardından, yaşam için aynı derecede hayati önem taşıyan diğer enzimlerden birkaçının düzenli etkinliklerine tanıklık etmek için iribaşın vücudunun kalan kısmında kısa bir gezintiye çıkıyoruz. Gitgide küçülen kuyruktan yeni gelişmekte olan arka bacaklara göç eden hücreleri takip ederken, genellikle bu hücrelerden kaynaklanan ve yetişkin kurbağa vücudunun yapısını destekleyecek olan kollajen liflerin yeni tren rayları gibi döşenmesine tanık oluyoruz. Bu yeni lifler, kollajenaz sayesinde serbest kalan amino asit altbirimlerini yakalayan ve onları tekrar birleştirerek yeni kollajen lifleri oluşturan enzimler tarafından yapılır. Bu enzimlerin içine dalmaya vaktimiz yok ama onların da aktif bölgelerinde, kollajenaz enziminde tanık olduğumuz türden koreografik hareketler, bu kez tepkimenin tam tersi yönde gerçekleşmesini sağlıyor. Başka yerlerde yaşamın bütün biyomolekülleri –yağlar, DNA, amino asitler, proteinler, şekerler– farklı farklı enzimler tarafında yapılmakta ve yıkılmakta. Ayrıca, gelişmekte olan kurbağanın her hareketi de benzer şekilde enzimler aracılığıyla gerçekleştiriliyor. Sözgelimi, hayvan bir sineği gözüne kestirdiğinde, gözlerinden beynine mesaj taşıyan sinirsel sinyallere, sinir hücrelerini dolduran bir grup nörotransmitter ve reseptörleri aracılık ediyor. Dilini dışarı fırlattığında, sineği ağzına çeken kas kasılmaları, kas hücrelerini dolduran ve ATPaz aktivitesi olan miyozin tarafından yürütülüyor. Sinek, kurbağanın midesine girdiği zaman, sindirimi hızlandıran ve sineğin yapısındaki besin maddelerini kurbağanın vücuduna emilecek şekilde açığa çıkaran bir grup enzim salgılanıyor. Başka enzimler, besin maddelerini kurbağa dokusuna dönüştürüyor ya da hücre mitokondrilerindeki solunum enzimleri yoluyla besinlerdeki enerjiyi yakalıyor.

Kurbağalardaki ve diğer canlı organizmalardaki her *yaşamsal* aktivite, onları ve bizi hayatta tutan her işlem, yaşamın motorları, yani temel parçacıkların hareketlerinin koreografisini düzenleme becerileriyle olağanüstü bir katalitik güce sahip olan ve bu güçle kuantum dünyasının derinliklerine dalarak bu dünyanın garip kanunlarından faydalanan enzimler tarafından hızlandırılır.

Fakat tünelleme, kuantum mekaniğinin yaşama sunduğu tek potansiyel avantaj değildir. Bir sonraki bölümde, biyosferdeki en önemli kimyasal tepkimenin, kuantum dünyasının bir başka numarasıyla ilgili olduğunu göreceğiz.

4
Kuantum vuru

Ağacın maddesi karbondur, peki o nereden gelmiştir? Havadan, havadaki karbondioksitten. İnsanlar ağaçlara bakıp onun [ağacın maddesinin] topraktan geldiğini düşünür; bitkiler topraktan büyür çünkü. Ama eğer "madde nereden geliyor?" sorusunu sorarsanız ... ağaçlar havadan gelir ... karbondioksit ve hava ağacın içine girer ve ağaç oksijeni çıkarıp yapıyı değiştirir ... Biliyoruz ki, [karbondioksitteki] oksijenle karbon birbirine çok sıkı bağlıdır ... ağaç bunu bozmayı nasıl bu denli kolay başarır? ... Oksijeni karbondan fırlatan güneşten gelen ışıktır ... geriye ağacın maddesini oluşturan karbon ve su kalır!

Richard Feynman[1]

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, daha çok bilinen kısaltmasıyla MIT, bilim dünyasının dinamolarındandır. 1861 yılında, Massachusetts eyaletinin Cambridge kentinde kurulmuş olan MIT, kadrosundaki bin profesörden dokuzunun Nobel Ödülü kazanmış olmasıyla övünür (2014 yılı itibarıyla). Mezunları arasında astronotlar (NASA'nın uzay uçuşlarının üçte birinde MIT mezunları görev almıştır), politikacılar (Birleşmiş Milletler eski genel sekreteri ve 2001 Nobel Barış Ödülü sahibi Kofi Annan dahil), Hewlett-Packard'ın kurucularından William Redington Hewlett gibi girişimcilerin yanı sıra kuantum elektrodinamiğinin

mimarlarından Nobel Ödüllü Richard Feynman gibi çok sayıda bilim insanı vardır elbette. Gelgelelim, MIT'nin en meşhur sakinlerinden biri insan değil bir bitki, bir elma ağacıdır. Enstitünün ikonik, Panteonvari kubbesinin gölgesinde kalan President's Garden'da büyüyen bu ağaç, Sir Isaac Newton'un, altında otururken şu ünlü elmanın düştüğünü gözlemlediği söylenen ağacın soyundan gelen ve İngiltere'deki Kraliyet Botanik Bahçeleri'nde bulunan bir başka ağaçtan çelikle üretilmiştir.

Newton'un, üç buçuk asır önce annesinin Lincolnshire'daki çiftliğinde bir ağacın altında otururken üzerinde düşünüp taşındığı basit ama derin soru şuydu: *Elmalar neden yere düşer?* Newton'un fizikte, aslına bakılırsa bilim dünyasında devrim yaratan yanıtının herhangi bir biçimde yetersiz olduğunu ileri sürmek kabalık gibi görünebilir; fakat o meşhur sahnenin Newton'un dikkatini çekmeyen ve o günden bu yana üzerinde durulmamış bir tarafı var: Bir kere o elmanın o ağaçta işi neydi? Elmanın yere inişine şaşırtıcı diyorsanız, Lincolnshire havasıyla suyunun bir araya gelip bir ağacın dallarına asılı küresel bir şey oluşturmasına ne diyeceksiniz? Newton neden dünyanın elma üzerinde uyguladığı kütleçekimi gibi nispeten önemsiz bir meseleyi merak ederken, meyvenin oluşumundaki akıl almaz bilmeceyi bütünüyle görmezden gelmiştir?

Isaac Newton'un bu konuyu merak etmemesinin nedenlerinden biri, on yedinci yüzyılda, canlı cansız bütün cisimlerde kaba mekaniğin fiziksel kanunlarla açıklanabilmesine karşılık, kendine has (pek çok başka şeyin yanı sıra elmaların da gelişimini belirleyen) iç dinamiğinin, herhangi bir tanrıtanımaz matematiksel denklemin ulaşamayacağı doğaüstü bir kaynaktan akan ve *élan vital* denen dirimsel kuvvet tarafından düzenlendiği görüşünün hâkim olmasıydı belki de. Fakat daha önce de gördüğümüz üzere biyoloji, genetik, biyokimya ve moleküler biyolojideki ilerlemeler, dirimselciliği yıkıp geçmiştir. Günümüzde, yaşamın bilimsel düşünce çerçevesinde açıklanabileceğinden şüphe duyan ciddi tek bir bilim insanı bile bulamazsınız; ancak bu açıklamayı hangi bilim dallarının

getirebileceği hâlâ büyük bir soru işaretidir. Schrödinger gibi bilim insanlarının alternatif iddialarına rağmen, biyologların çoğu hâlâ klasik yasaların yeterli olduğuna, top-çubuk modeliyle gösterilen biyomoleküllerin Newtoncu kuvvetlerin etkisiyle isteka ve top gibi davrandığına inanmaktadır. Hatta Schrödinger'in entelektüel ardıllarından biri olan Richard Feynman bile fotosentezi (bu bölümün başındaki alıntıdan anlaşılacağı üzere), "oksijeni karbondan fırlatan güneşten gelen ışıktır" ifadesiyle ışığın oksijeni karbondioksit molekülünden golf topu gibi fırlatan bir tür golf sopası şeklinde davrandığı, tam anlamıyla klasik açıdan tarif etmiştir.

Moleküler biyoloji ve kuantum mekaniği eşgüdümlü olmaktan ziyade birbirine paralel gelişmiştir. Biyologlar, fizik konferanslarına pek katılmaz; fizikçilerse biyolojiyle pek alakadar değildir. Fakat Nisan 2007 tarihinde, kuantum enformasyon teorisi denen, çok sınırlı bir kesimin ilgilendiği bir alanda çalışan MIT'den bir grup fizikçi ve matematikçi, herkesin sırayla bilimsel literatürde yeni bir makaleyi sunduğu makale saatinin keyfini çıkarırken, gruptan biri, *New York Times*'ın, bitkilerin *kuantum bilgisayarları* olduğunu ileri süren bir makalenin yayımlandığı sayısıyla çıkageldi. Grup kahkahaya boğuldu. Ekip elemanlarından Seth Lloyd, bu "kuantum dalaveresi"ni ilk duyduğu ânı şöyle hatırlıyor: "Bunun gerçekten de çılgınca olduğunu düşündük ... 'Aman Tanrım, bu hayatımda duyduğum en kaçıkça fikir!' diye geçti aklımızdan."[2] Bu şüpheciliğin nedeni, dünyada en geniş bütçeli, en parlak araştırma gruplarının, belli hesaplamaları günümüzün en güçlü bilgisayarlarından çok daha hızlı ve verimli yapabilecek bir makine olan kuantum bilgisayarının nasıl yapılacağını bulmak için yıllardır uğraşıyor olmasıydı (bir kuantum bilgisayarında paralel işleme esasına uygun şekilde, dijital enformasyon bitleri 0 ya da 1 değil, aynı anda hem 0 hem 1 olduğu için olası bütün hesaplamalar ânında yapılabilir). *New York Times*'taki makaleyse, kendi halinde bir tutam otun, kuantum hesaplamanın odağındaki kuantum hilelerini yapabildiğini iddia ediyordu. Bu MIT araştırmacılarının konuya kuşkuyla yaklaşması hiç

de şaşırtıcı değil. Yapmayı bir türlü başaramadıkları kuantum bilgisayarını, makaleye bakılacak olursa, öğle yemeğinde salata olarak yiyorlardı!

O sırada, MIT dergi kulübü gülmekten kırıladursun, onlara pek de uzak olmayan bir yerde, saniyede yaklaşık 300.000 km hızla giden bir ışık fotonu, soyu sopu pek ünlü bir ağaca doğru yol almaktaydı.

Kuantum mekaniğinin özündeki gizem

Şu fotonla ağaç meselesine ve kuantum dünyasıyla ne gibi bir ilişkileri olduğuna az sonra geri döneceğiz ama önce, kuantum dünyasının gerçekten de ne kadar tuhaf olduğunu belli eden, güzelliğini basitliğinden alan bir deneyden bahsedelim. "Kuantum süperpozisyon" gibi kavramları elimizden geldiğince açıklamaya çalışacağız, ancak hiçbir şey meseleyi burada tarif edeceğimiz çift yarık deneyi kadar iyi anlatamaz.

Çift yarık deneyinin, ortaya koyduğu en basit ve çıplak durum, kuantum dünyasında *her şeyin farklı olduğu* gerçeğidir. Parçacıklar uzayda yayılan dalgalar gibi davranabilir ve dalgalar da bazen yeri belli tekil parçacıklar gibi davranır. Dalga-parçacık ikiliği kavramıyla daha önce giriş bölümünde, güneş enerjisinin nasıl oluştuğunu açıklarken; üçüncü bölümde, elektronların ve protonların dalga özelliklerinin, enzimlerde enerji bariyerlerinden sızmalarını nasıl sağladığını anlatırken karşılaşmıştık. Bu bölümdeyse, dalga-parçacık ikiliğinin biyosferdeki en önemli biyokimyasal tepkimede –hava, su ve ışığın bitkilere, mikroplara ve dolaylı olarak hepimize dönüşümünde– rol oynadığını göreceksiniz. Ama ilk önce, parçacıkların aynı anda pek çok yerde olabileceğine dair garip fikri bize kabul ettiren, bugüne kadar yapılmış en basit, en incelikli ama aynı zamanda en kapsamlı ve Richard Feynman'a göre "kuantum mekaniğinin özünü barındıran" deneyi görelim.

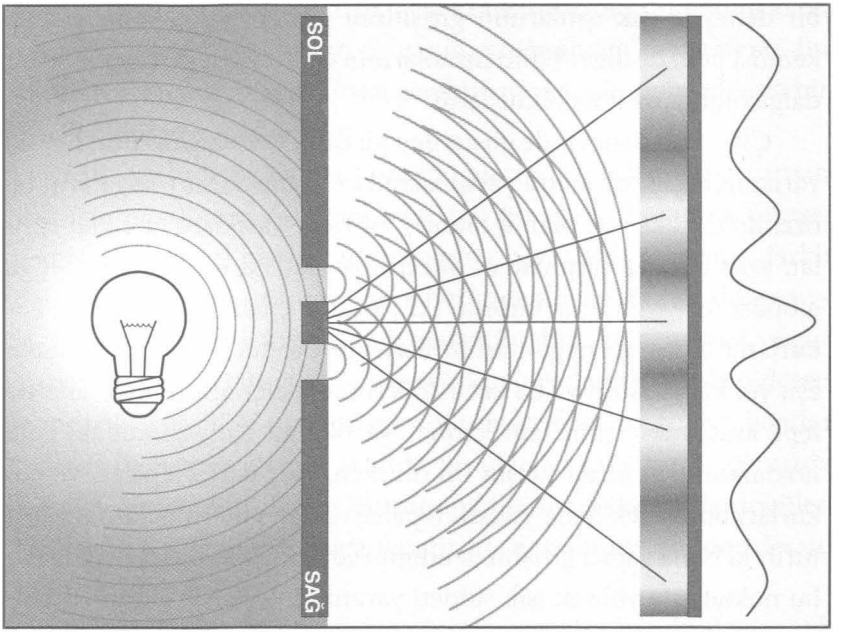
Ancak önceden uyaralım, burada tarif edeceklerimiz size imkânsızmış gibi görüneceği için olan bitenin daha mantıklı bir

açıklaması olduğundan kendinizi emin hissedeceksiniz. Kendinizi, bir illüzyonmuş gibi görünen bu deneydeki el çabukluğunun hangi noktada işe karıştığını düşünürken bulabilirsiniz. Ya da deneyin doğanın işleyişini kavramak için gereken hayalgücünden yoksun bilim insanlarının salt kuramsal spekülasyonundan ibaret olduğunu düşünebilirsiniz. Fakat bu açıklamaların ikisi de doğru değil. Çift yarık deneyi sağduyuya aykırı ve saçma görünse de gerçektir ve binlerce kez tekrarlanmıştır.

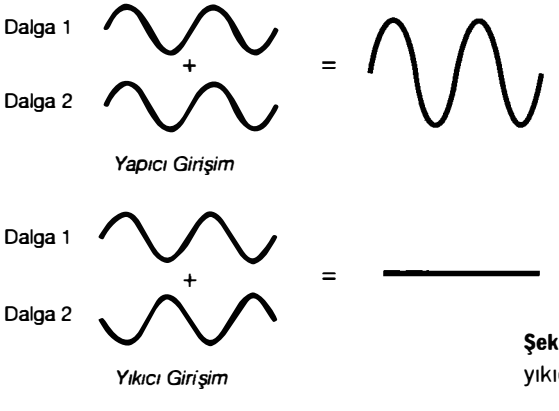
Deneyi üç aşamada anlatacağız. İlk iki aşama sizi hazırlamak için ki böylece üçüncü ve ana aşamanın afallatıcı sonuçlarını kavrayabilesiniz.

Öncelikle, bir monokromatik (tek bir renk, yani dalga boyu içeren) ışık ışını, üzerinde iki yarık olan bir ekrana düşürülür ve ışığın bir kısmı bu ekrandaki yarıklardan geçerek ikinci bir ekranın üzerine düşer (şekil 4.1). Yarıkların genişliğini, iki yarık ve iki ekran arasındaki mesafeyi dikkatle ayarlayarak, ikinci ekranın üzerinde bir dizi açıklı-koyulu bant elde edebiliriz; buna girişim (interferans) deseni denir.

Girişim desenleri dalgaların imzası gibidir ve herhangi bir dalga ortamında kolayca görülürler. Durgun bir göle bir çakıl taşı atın ve dalgaların eşmerkezli halkalar şeklinde, taşın suya düştüğü noktadan dışa doğru yayılmasını izleyin. Aynı göle bu kez iki taş atarsanız, her biri kendi genişleyen eşmerkezli dalgalarını yaratır, ancak iki çakıl taşından kaynaklanan dalgaların üst üste bindiği bölgelerde görebileceğiniz bir girişim deseni oluşur (şekil 4.2). Bir dalganın tepesi diğerinin çukuruyla karşılaştığında oluşan sönümlenmeden ötürü bu noktalarda dalga oluşmaz. Buna yıkıcı girişim denir. Tersine, iki tepe ya da iki çukur karşılaştığında bunlar birbirini güçlendirerek dalganın iki katı kadar bir dalga oluşturur; buna da yapıcı girişim denir. Dalgaların birbirini söndürerek ya da güçlendirerek meydana getirdiği desen herhangi bir dalga ortamında oluşabilir. Aslında iki yüzyıldan uzun bir süre önce İngiliz fizikçi Thomas Young'ın, çift yarık deneyinin ilk biçimi diyebileceğimiz



Şekil 4.1: Çift yarık deneyi, 1. aşama. Monokromatik (belli bir dalga boyuna sahip) ışık, iki yarığın üzerine düşürüldüğünde, yarıklardan her biri diğer taraf için yeni bir ışık kaynağı görevi görür ve ışık dalga özelliğinden ötürü, yarıklardan geçerken yayılarak kırınıma uğrar (difraksiyon); böylece dairesel dalgaların çakışması ve birbiriyle girişim yapması sonucu arka taraftaki ekranın üzerinde aydınlık ve karanlık bantlar oluşur.



Şekil 4.2: Dalgaların yapıcı ve yıkıcı girişimi.

bir deneyde ışık ışınlarının girişimini göstermesi sayesinde hem kendisi hem de diğer bilim insanlarının çoğu ışığın gerçekten de bir dalga olduğuna ikna olmuşlardı.

Çift yarık deneyinde gösterilen girişim, ışık dalgalarının her iki yarıktan geçtikten sonra yayılmasından kaynaklanır (dalgaların bu özelliği difraksiyon olarak bilinir); böylece yarıklardan çıkan ışınlar, arka ekrana çarpmadan önce, tıpkı sudaki dalgalarda olduğu gibi üst üste çakışarak birleşir. İki yarıktan çıkan ışık dalgaları, çukurlarla tepelerin uygun adım ilerlemesi sonucu ya ekrana kadar eşit yol kat ettikleri ya da kat ettikleri mesafeler arasındaki fark, iki tepe arası mesafenin tam katına eşit olduğu için, ekrandaki belli noktalara *aynı fazda* ulaşır. Bu olurken, dalgaların tepeleri ve çukurları birleşerek daha yüksek tepeler ve daha derin çukurlar oluşturur ki buna yapıcı girişim dendiğini söylemiştik. Birleşen dalgalar bu noktalarda yüksek ışık şiddeti yaratır, dolayısıyla ekran üzerinde aydınlık bir bant görünür. Ama diğer noktalarda, iki yarıktan geçen ışık *farklı fazda* gelir; yani bir dalganın tepesi, bir diğerinin çukuruyla buluşur. Bu noktalarda dalgalar birbirini söndürdüğünden ekranda karanlık bir bant oluşur (yıkıcı girişim). Bu iki uç arasındaki kombinasyonlar ne tamamen "aynı fazda" ne de tamamen "farklı fazda"dır ve bir miktar ışık ulaşır. Bu yüzden, ekranda keskin sınırlarla ayrılmış aydınlık ve karanlık bant dizisi yerine, girişim deseninde ışık şiddetinin maksima ve minima olarak bilinen iki ucu arasında yumuşak bir varyasyon izlenir. İntensitedeki bu dalga benzeri yumuşak varyasyon, dalga fenomeninin başlıca göstergesidir. Bunun en fazla aşina olduğumuz örneklerinden biri ses dalgalarıdır. Enstrümanını akort eden bir müzisyen, bir notanın frekansı bir diğerininkine çok yakın olduğunda, kulağına kimi zaman aynı fazda kimi zaman farklı fazda ulaşan ses dalgalarından kaynaklanan "vuru"ları* dinler. Bu birleşik örüntüdeki varyasyon, volümü

* Bunlar, hemen hemen aynı frekansta olan ahenkli iki notanın ses volümünde yarattığı dalgalanmalar, yani bir tür atımdır. "Vuru" teriminin buradaki anlamı, müzikte daha yaygın olarak karşılaştığımız ritim anlamındaki kullanımıyla karıştırılmamalıdır.

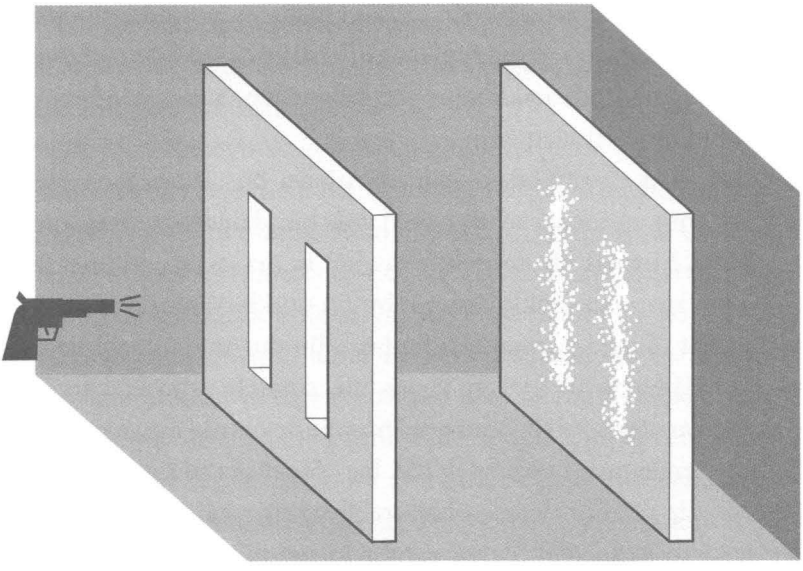
düzenli aralıklarla artıp azalan bir ses oluşturur. Ses şiddetindeki bu yumuşak varyasyon, iki ayrı dalganın girişiminden kaynaklanır. Bu vuruların, kuantum açıklaması gerektirmeyen, bütünüyle klasik bir örnek olduğuna dikkat edin.

Çift yarık deneyindeki kilit etkenlerin biri, ilk ekrana çarpan ışık ışınının monokromatik, yani tek bir dalga boyunda olması gereğidir. Normal bir ampulün yaydığı beyaz ışıksa, tersine, farklı dalga boylarından (gökkuşağının bütün renkleri) oluşur; dolayısıyla dalgalar ekrana karmakarışık ulaşır. Bu durumda, tepeler ve çukurlar hâlâ birbiriyle girişim yapsa bile, sonuçta ortaya çıkan desen o kadar karmaşık ve sürüntü görünümünde olur ki ayrı ayrı bantlar halinde seçilemez. Benzer şekilde, bir göle iki çakıl taşı attığımızda kolayca bir girişim deseni oluşturabildiğimiz halde, göle dökülen bir şelale o kadar çok dalga yaratır ki uyumlu bir girişim deseni bulmak imkânsızdır.

Gelelim ikinci aşamaya; bu kez çift yarık deneyinde ekrana ışık yerine mermi gönderelim. Burada önemli olan, yayılan dalgalar yerine katı parçacıklar kullanıyor olmamız. Mermilerin her biri elbette ki iki yarığın sadece birinden geçecektir, ikisinden birden değil. Yeterli sayıda mermi geçtiğinde, arka ekranda, mermilerin geçtiği iki yarığa karşılık gelen, deliklerden oluşmuş iki bant görürüz (şekil 4.3). Bu örneğin dalgalarla ilgili olmadığı açık. Her mermi, diğer mermilerle ilişkisi olmayan bağımsız bir parçacıktır, o nedenle girişim meydana gelmez.

Sıra geldi üçüncü aşamaya, "sihirli kuantum numarasına". Bu kez deneyi mermi yerine atomları kullanarak tekrarlıyoruz. Atom huzmesi oluşturan bir kaynak, atomları üzerinde yeterince dar iki yarık bulunan ekrana ateşliyor.* İkinci ekran, atomların çarptığını saptamak amacıyla, her bir atomun çarptığı yerde minicik parlak bir noktanın belirdiği fotolüminesan bir yüzeyle kaplı.

* Yarıkların gerçekten de çok dar ve birbirine yakın olması gerek. 1990'lı yıllarda yapılan deneylerde altın folyodan yapılmış bir ekran kullanılmıştı ve yarıkların genişliği sadece bir mikrometre (bir milimetrenin binde biri) kadardı.



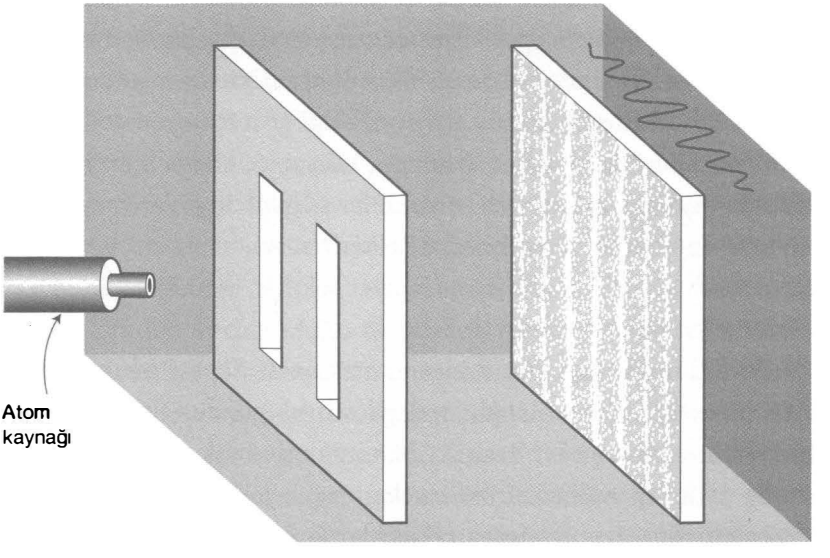
Şekil 4.3: Çift yarık deneyinin 2. aşaması. Işık örneğinde gördüğümüz dalga davranışından farklı olarak, yarıklara doğru ateşlenen mermiler parçacık davranışı sergiler. Arka ekrana çarpan her mermi deliklerden birinden –ama her ikisinden değil– geçmiş olmalıdır (ortadaki ekranın, yarıkları ıskalayan mermileri durdurabilecek kadar kalın olduğunu varsayarsak elbette). Arka ekranda oluşan desen, çok sayıda banttan oluşan girişimden çok, yarıkların her birine karşılık gelen dar şeritler halinde bir kümelenme gösterir.

Mikroskobik düzeyde sağduyumuzun söylediği geçerli olsaydı, atomların olağanüstü minik mermiler gibi davranması gerekirdi. Deneyi önce yalnızca soldaki yarık açıkken yaparsak, arka ekranda açık yarığın karşısına gelen yerde parlak noktalardan oluşan bir bant görürüz. Noktalarda bir miktar dağılma gördüğümüz için bunun, atomlardan bazılarının dosdoğru yarıktan geçmek yerine, kenarlara çarpıp geri sekmesinden kaynaklandığını varsayabiliriz. Şimdi, sağdaki yarığı da açıp arka ekranda parlak noktaların belirmesini bekleyelim.

Parlak noktaların dağılımı konusunda fikir yürütmeniz gerekseydi ve kuantum mekaniği hakkında hiçbir şey bilmeseydiniz,

doğal olarak mermilerin oluşturduğuna çok benzer bir desen izleneceğini, yani her yarığın arkasında noktaların kümelenmesiyle birer bant oluşacağını ve böylece ortada en parlak olan ve kenarlara doğru atom "çarpmaları" seyrekleştikçe tedrici olarak soluklaşan iki ayrı aydınlık alan meydana geleceğini tahmin ederdiniz. Ayrıca, hangi yarıktan geçerse geçsin atomların erişmesinin en zor olduğu bölgeye karşılık gelen, iki parlak alan arasındaki orta noktanın karanlık görünmesini beklerdiniz.

Ama gördüğümüz şey bu değildir. Onun yerine, tıpkı ışık örneğinde olduğu gibi, aydınlık ve karanlık bantlardan oluşmuş, çok bariz bir girişim deseni görürüz. İster inanın ister inanmayın, en



Şekil 4.4: Çift yarık deneyi, 3. aşama. Mermi yerine bir kaynaktan yarıklara doğru atomlar fırlatıldığında (her aşamada yarıkların genişliğinin ve aralarındaki mesafenin doğru seçilmiş olması koşuluyla elbette), yine dalga benzeri bir girişim deseninin ortaya çıktığını görürüz. Her atom, parçacık doğasına işaret eder biçimde, arka ekranın belli bir noktasına çarptığı halde, noktacıklar tıpkı ışık örneğinde olduğu gibi bantlar halinde kümelenir. O halde her iki yarıktan da aynı anda geçen ve çoğul girişim bantlarını görmemizi mümkün kılan şey nedir?

parlak kısım ekranın tam ortası, yani çok sayıda atomun ulaşmasını beklemediğimiz alandır (şekil 4.4). Gerçekten de, yarıklar ve ekranlar arasındaki mesafeleri mükemmel bir şekilde ayarlayarak, (yalnız bir yarık açıkken atomların ulaşabildiği alan olan) arka ekrandaki parlak bölgenin, ikinci yarığı da açtığımızda (atomlar oraya çarpmayacağından) karanlık görünmesini sağlayabiliriz. Diğer yarığı açmak, daha çok sayıda atomun geçmesine olanak tanıması gerekirken, nasıl olur da ekranın belli bölgelerine atomların ulaşmasını engelleyebilir?

Bakalım, olan biteni şimdilik kuantum mekaniğine başvurmaktan kaçınarak, salt sağduyumuzla açıklayabilecek miyiz? Diyelim ki, her atom yeri belli minicik bir parçacık olduğu halde –ne de olsa her atom ekrana tek bir noktada çarpar– birbiriyle belli bir eşgüdüm içinde çarpışıp etkileşen atomların hepsi bir bütün olarak girişim *görünümünde* bir desen oluşturuyor. Nitekim su dalgalarının da aslında kendi başına dalga özelliği göstermeyen çok sayıda su molekülünden meydana geldiğini biliyoruz. Dalga benzeri özellikleri oluşturan şey tek tek moleküller değil, trilyonlarca su molekülünün eşgüdümlü hareketidir. Belki de atom tabancası, bir yüzme havuzundaki dalga makinesine benzer şekilde, eşgüdümlü bir atom akımı yaratmaktadır.

Eşgüdümlü atom kuramını sınamak üzere deneyi tekrarlayalım ama bu sefer, atomları topluca değil *tek tek* gönderelim. Atom tabancasını ateşleyip, bir sonraki atomu ateşlemeden önce arka ekranda aydınlık noktanın belirmesini bekleyelim. Başlangıçta her şey sağduyuya uygun görünür. Yarıklardan geçebilen her atom, ekranın belli bir yerinde minicik parlak bir nokta bırakır. Görünüşe göre, atomlar tabancadan mermi benzeri parçacıklar olarak çıkıp ekrana da birer parçacık olarak çarpmaktadır. Kuşkusuz, tabanca ile ekran arasındayken de benzer şekilde parçacık gibi davranıyor olmalılar. Ancak bu noktada şapkadan kuantum tavşanı çıkar. Her biri mermi gibi davranan tek bir atomun ekrana varışını kaydeden noktalar ekran üzerinde kümelendikçe, açıklı koyulu girişim deseni

de yeniden yavaş yavaş belirir. Bu aşamada atomlar yarıklardan birer birer geçtiğine göre, artık çok sayıda atomun birbiriyle çarpışıp etkileşimde bulunduğu kolektif bir davranıştan söz edemeyiz. Artık atomların su dalgalarına benzer bir tarafı kalmamıştır. Ve işte bir kez daha, sağduyuya ne denli aykırı olursa olsun, iki yarıktan sadece biri açıkken atomların arka ekran üzerinde ulaştığı yerlerin, ikinci yarık da açıkken tamamen karanlık olduğu gerçeğiyle yüz yüze geliyoruz; hâlbuki ikinci yarığın açık olması aslında atomun ekrana ulaşması için ek bir yol sağlamalıydı. Sanki bir yarıktan geçen atom, her nasılsa diğer yarığın da açık olup olmadığının *farkında* da ona göre davranıyor!

Özetleyecek olursak, her atom tabancadan yeri belli minicik bir parçacık olarak çıkar ve ikinci ekrana, çarptığı yerde beliren minicik ışık parlamasından da anlaşılacağı üzere yine bir parçacık olarak varır. Fakat atom aradaki yolda ilerlerken iki yarıkla karşılaştığı zaman, kırınım yoluyla iki bileşene ayrılarak her biri bir yarıktan geçen ve diğer tarafta girişim yapan bir dalganın davranışını andıran gizemli bir şey olur. Tek bir atom, iki yarığın aynı andaki durumunun (açık mı yoksa kapalı mı olduğunun) başka türlü nasıl *farkında* olabilir ki!

Bu işte bir el çabukluğu olabileceği şüphesiyle, yarıkların ardında sotaya yatıp bekleyelim ve atomları yakalayıp yakalayamayacağımıza bakalım. Bunu, sözgelimi soldaki yarığın arkasına, yarıktan ne zaman bir atom geçse bir "sinyal" (mesela bip sesi) veren bir detektör yerleştirerek yapmak mümkün.* Diğer yarıktan geçen atomları yakalamak için sağ taraftaki yarığın üzerine de ikinci bir detektör yerleştirebiliriz. Artık o ya da bu yarıktan bir atom geçtiği anda sağdaki ya da soldaki detektörden gelen bir bip sesi duyacağız. Ancak atom bir şekilde mermi benzeri özelliğinden sıyrılarak her

* Burada detektör veriminin %100 olduğunu ve gözlediği yarıktan bir atom geçerse kesinkes sinyal verdiğini, buna karşılık atomun yolunu herhangi bir şekilde etkilemediğini varsayıyoruz. Ancak az sonra göreceğimiz üzere, yaptığımız gözlemle atomun geçişini kaçınılmaz olarak bozduğumuz için, uygulamada böyle bir şey mümkün değil elbette.

iki yarıktan birden geçmeyi başarabilirse, o zaman iki detektörden de aynı anda bip sesi gelecektir.

Bu deneyin sonucunda görürüz ki, atom tabancasını her ateşlediğimizde ekranda parlak bir nokta belirirken soldaki ya da sağdaki detektörden bip sesi gelir ama asla ikisi birden sinyal vermez. Herhalde artık elimizde, girişim yapan atomların, yarıkların her ikisinden aynı anda geçmeyip, ancak birinden geçtiğine dair kanıt var. Ama acele etmeyin ve ekranı izlemeye devam edin. Çok sayıda parlak nokta kümelenip birleştikçe, ortaya çıkan şeyin artık bir girişim deseni olmadığını görürüz. Onun yerine sadece iki parlak bant görülür ki bu, tıpkı mermi deneyinde olduğu gibi, atomların her bir yarığın arkasında kümelendiğini gösterir. Atomlar bu kez deney boyunca alışılageldik parçacıklar gibi davranmıştır. Sanki her atom, yarıklarla karşılaştığında *gözetlenmediği sürece* dalga gibi davranmakta, buna karşılık gözetlendiğinde kendi halinde bir parçacık olarak kalmaktadır.

Belki de sorun detektörün varlığıdır; belki de detektör yarıklardan geçen atomların garip ve hassas davranışını bozmaktadır. Hadi, detektörlerden birini, mesela sağ yarıktaki detektörü söküp bu ihtimali sınayalım. Bu yeni düzenlemeyle hâlâ aynı veriyi elde edebiliriz çünkü atom tabancasını ateşleyip de bip sesini duyup, ekran üzerinde parlak bir nokta gördüğümüzde atomun sol yarıktan geçmiş olması gerektiğini biliriz; tabancayı ateşlediğimizde bip sesi duymadan parlak noktayı görürsek, o zaman da atomun sağ yarıktan geçip ekrana ulaşmış olduğunu biliriz. Artık atomların hangi yarıktan geçtiğini bildiğimiz halde, yollardan sadece birini "rahatsız ediyoruz". Eğer sorunun kaynağı detektörün kendisiyse, bip sesi çıkmasına neden olan atomların mermi, ses çıkmayan taraftan geçenlerinse dalga gibi davranmasını bekleriz. Belki de şimdi ekran üzerinde, mermi örneğindeki desenle (soldaki yarıktan geçen atomlardan kaynaklanan) girişim deseninin (sağdaki yarıktan geçen atomlardan kaynaklanan) bir karışımını göreceğiz.

Ama öyle olmuyor. Bu düzenlemede de herhangi bir girişim deseni görmüyoruz. Ekranda, her iki yarığın da arkasında, mermi örneğindekine benzer noktalardan oluşmuş bir desen beliriyor sadece. Görünen o ki, atomun yerini belirleyebilen bir detektörün sadece varlığı bile, onun dalga benzeri davranışını yok etmeye yeterli; hatta bu detektör, diğer yarıktan geçen atomun yolu üzerinde bulunmasa bile!

Belki de soldaki yarığın üzerinde bulunan detektörün fiziksel varlığı, hızlı akan bir nehirde suyun akışını değiştiren büyük bir kaya gibi, atomların güzergâhını etkilemeye yeterli oluyordur. Bunu, sol detektörü kapatarak sınayabiliriz. Detektör hâlâ yerinde durduğu için hemen hemen aynı etkiyi göstermesini bekleriz. Fakat bu kez, detektör yerinde ama kapalıyken, ekran üzerinde bir kez daha girişim deseni belirir! Deneydeki atomların hepsi yeniden dalga gibi davranmaya başlar. Soldaki yarığın detektörü açıkken parçacık gibi davranan atomlar, nasıl olur da detektör kapatıldığı anda dalga gibi davranabilmiştir? Sağdaki yarıktan geçen bir parçacık, nasıl olur da soldaki yarığı izleyen detektörün açık mı kapalı mı olduğunu *bilebilir*?

İşte bu aşamada, sağduyunun sesini bir kenara bırakmanız gerek. Şimdi atomlar, elektronlar ya da fotonlar gibi minicik cisimlerin dalga-parçacık ikiliğiyle, yani hangi yarıktan geçtiği konusunda elimizde veri olmadığında dalga benzeri, gözlemlediğimiz zamansa parçacık benzeri davranış sergilemeleriyle yüzleşmemiz gerek. Bu, birinci bölümde Alain Aspect'in birbirinden ayrılmış fotonlarda gösterdiği kuantum dolanıklığını incelerken karşımıza çıkan, kuantum varlıkların gözlemlenmesi ya da ölçümü sürecidir. Hatırlarsanız, Aspect'in ekibi fotonları, onların dalga doğasının bir yanı olan dolanıklık durumunu ortadan kaldıran polarize bir mercekten geçirip tek bir klasik polarizasyon yönünü *seçmeye* zorlayarak ölçüm yapmıştı. Benzer şekilde, çift yarık deneyinden geçen atomların ölçümü de onları sol ya da sağ yarık arasında bir seçim yapmaya zorlar.

Kuantum mekaniği aslında bize bu fenomenin mükemmelen mantıklı bir açıklamasını sunarsa da bu ancak gözlemlediğimiz şeyi –deneyin sonucunu– açıklar, bakmadığımız zaman neler olup bittiğini değil. Ama devam etmek için elimizde sadece görebildiklerimiz ve ölçebildiklerimiz olduğuna göre belki de daha fazlasını istemenin mânâsı yok. Bir fenomenin açıklamasının meşruiyetini ya da doğruluğunu nasıl değerlendirebiliriz, onu ilkesel olarak dahi, gözlemleyemiyorsak? Bunu denediğimiz an sonucu değiştiriyoruz.

Çift yarık deneyinin kuantum yorumuna göre, zaman içinde herhangi bir anda her atom uzaydaki olasılıklı konumunu tanımlayan bir grup sayıyla tarif edilmelidir. Bu, ikinci bölümde *dalga fonksiyonu* adıyla sözünü ettiğimiz niceliktir. O bölümde bu kavramı, bir şehrin farklı semtlerindeki hırsızlık olasılıklarını belirlemek suretiyle şehirde yayılan suç dalgasının izini sürme fikrine benzetmiştik. Çift yarıktan geçen bir atomu tarif eden dalga fonksiyonu da benzer şekilde, atomun herhangi bir zamanda aletin herhangi bir yerinde bulunma ihtimalini takip eder. Fakat daha önce de altını çizdiğimiz gibi, bir hırsız uzay ve zamanda tek bir konumda bulunmak zorundadır ve "suç olasılığı" dalgası sadece onun nerede olduğunu bilmediğimizi ifade eder; oysaki çift yarık deneyinde atomun dalga fonksiyonu bunun tam tersine, ölçmediğimiz sürece gerçekten de belli bir konumu olmayan ve biz ölçüm yapana dek, elbette değişen olasılıklarla, aynı anda her yerde birden bulunan atomun kendi fiziksel durumunu temsil etme anlamında *gerçektir*; öyle ki, dalga fonksiyonunun küçük olduğu yerlerde atomu bulmamız pek muhtemel değildir.

O yüzden çift yarık deneyinden geçen atomları tek tek ele almak yerine, kaynaktan arka ekrana doğru yol alan dalga fonksiyonunu göz önünde bulundurmamız gerekir. Dalga fonksiyonu yarıklarla karşılaştığında ikiye ayrılır ve yarısı bir yarıktan, diğer yarısı diğer yarıktan geçer. Burada tarif ettiğimiz şeyin, soyut bir *matematiksel* niceliğin zaman içindeki değişimi olduğuna dikkatinizi çekelim.

Kontrol etmek için bakmak zorunda olduğumuza göre, *gerçekten* ne olup bittiğini sormak abestir. Bunu yaptığımız anda sonucu değiştiririz. Gözlemler arasında *gerçekten* ne olup bittiğini sormak, buzdolabının kapısını açmadan ışığının yanıp yanmadığını sormaya benzer: Bu sorunun yanıtını asla bilemezsiniz çünkü kapıyı aralayıp içeri baktığınız anda sistemi değiştirmiş olursunuz.

O halde karşımıza şu soru çıkıyor: Dalga fonksiyonu ne zaman tekrar konumu belli bir atom "haline gelir"? Yanıtsa şu: konumunu saptamaya çalıştığımız zaman. Böyle bir ölçüm yapıldığında, kuantum dalga fonksiyonu tek bir olasılığa *çöker*. Bir kez daha belirtelim, bu durum, polis tarafından enselendiğinde, nerede olduğu konusundaki belirsizliğin tek bir noktaya çöktüğü hırsız örneğindeki durumdan çok farklıdır. Çünkü o örnekte, hırsızın konumunun saptanmasından etkilenen şey sadece hırsızın nerede olduğu konusunda sahip olduğumuz bilgiydi. Hırsız belli bir anda tek bir yerdeydi. Oysa atom için durum farklı; ölçüm yapılmadığında atom gerçekten de her yerdedir.

Demek ki kuantum dalga fonksiyonu, atomun *–o andaki konumuna ilişkin bir ölçüm yapıyor olmamız halinde–* belli bir yerde saptanma olasılığını hesaplar. Dalga fonksiyonunun ölçümden önce büyük olduğu yerde atomu bulma olasılığımız da yüksek olacaktır. Dalga fonksiyonunun, belki de yıkıcı girişim nedeniyle küçük olduğu yerdeyse, bakmaya karar verdiğimiz anda atomu bulma olasılığımız aynı oranda düşük olacaktır.

Tek bir atomu kaynağından ayrılırken tarif eden dalga fonksiyonunu izlediğimizi hayal edebiliriz. Önce yarıklara doğru akan bir dalga gibi davranır; dolayısıyla ilk ekran düzeyinde yarıklardan her birinde aynı şiddette olacaktır. Yarıklardan birine bir detektör yerleştirirsek eşit olasılık beklemeliyiz: Atomu sol yarıkta saptama olasılığı yüzde 50, sağ yarıkta saptama olasılığı yüzde 50'dir. Ancak eğer atomu ilk ekran düzeyinde saptamaya çalışmazsak –ki meselenin can alıcı noktası budur– o zaman dalga fonksiyonu çökmeksizin her iki yarıktan da geçer. Sonrasında, kuantum terimleriyle ifade edersek,

süperpozisyon halinde olan, yani aynı anda iki yerde birden bulunabilen bir atomu tanımlayan, hem soldaki hem de sağdaki yarıktan aynı anda geçen bir dalga fonksiyonundan söz edebiliriz.

Yarıkların diğer tarafında, dalga fonksiyonunun ayrılarak biri sol diğeri sağ yarıktan geçen parçalarının her biri yeniden yayılarak, bazı noktalarda birbirinin amplitüdünü güçlendirecek, diğer noktalardaysa söndürecek şekilde örtüşen matematiksel dalgacık kümeleri oluşturur. Ortaya çıkan birleşik etkiden ötürü, dalga fonksiyonu artık ışık gibi diğer dalga fenomenlerinin desen özelliğini gösterir. Ancak artık karmaşıklaşmış bu dalga fonksiyonunun hâlâ tek bir atomu tanımladığını aklınızdan çıkarmayın.

Atomun konumuyla ilgili ölçümün sonunda gerçekleştiği ikinci ekran düzeyinde, dalga fonksiyonu, parçacığın ekran üzerinde farklı noktalarda saptanma olasılığını hesaplamamızı sağlar. Ekrandaki parlak alanlar, dalga fonksiyonunun iki yarıktan gelen iki parçasının birbirini güçlendirdiği konumlara; koyu renk alanlarsa birbirini söndürdüğü için atomların saptanma olasılığının sıfırlandığı konumlara karşılık gelir.

Bu güçlendirme ve söndürme sürecinin –kuantum girişim– tek parçacık söz konusu olsa dahi gerçekleştiğini hatırlamanız önemli. Ekran üzerinde, teker teker fırlatılan atomların sadece bir yarık açıkken ulaşabildiği ama her iki yarık da açıkken ulaşılmaz hale gelen bölgeler olduğunu unutmayın. Bu durum, ancak atom tabancasından serbest kalan her atom, her iki güzergâhı da eşzamanlı olarak keşfedebilen bir dalga fonksiyonuyla tanımlanırsa anlam kazanır. Yapıcı ve yıkıcı girişim bölgeleriyle birleşik dalga fonksiyonu, atomun, tek bir yarığın açık olması halinde ekran üzerinde ulaşabileceği kimi konumlarda bulunma olasılığını sıfırlar.

İster temel parçacıklar ister bu parçacıklardan meydana gelmiş atomlar ve moleküller olsun, bütün kuantum varlıklar uyumlu dalga benzeri davranış sergiledikleri için kendileriyle girişim yapabilir. Bu kuantum durumunda, aynı anda iki yerde birden bulunmak, aynı anda iki yönde spin yapmak, geçirgen olmayan bariyerlerden

tünelleme yoluyla sızmak ya da uzaktaki eşiyle hayaletimsi dolanıklık bağlantıları kurmak gibi garip kuantum davranışlarının hepsini gösterebilirler.

Peki o zaman siz ya da ben, bütünüyle kuantum parçacıklardan oluştuğumuza göre, yoğun bir günde çok işimize yarayacağı halde neden aynı anda iki yerde birden olamıyoruz? Yüzeysel olarak baktığımızda bu sorunun yanıtı çok basit aslında: Bir cisim ne kadar büyük ve kütleliyse, gösterdiği dalga benzeri özellik o denli az olacaktır. İnsan boyutları ve kütlesindeki bir şeyin, hatta aslına bakarsanız çıplak gözle görülebilecek denli büyük herhangi bir şeyin kuantum dalga boyu o kadar miniciktir ki bunun ölçülebilir bir etkisi olmaz. Fakat daha derinlemesine baktığınızda, vücudunuzdaki her atomun, etrafındaki diğer atomlar tarafından gözlemlendiğini ya da ölçüldüğünü ve bu nedenle hassas kuantum özelliklerinin çabucak yok olduğunu düşünebilirsiniz.

O halde "ölçüm" derken neyi kast ediyoruz aslında? Bu sorunun yanıtına birinci bölümde kısaca değinmiştik ama şimdi kuantum biyolojisinde ne kadar "kuantum" olduğu sorusunda merkezi rol oynadığı için bu konuya daha yakından bakmalıyız.

Kuantum ölçüm

Kuantum mekaniği, bütün başarısına rağmen, bir elektronun, diyelim ki atomun etrafında nasıl hareket ettiğini açıklayan denklemler ile o elektrona ilişkin belirli bir ölçüm yaptığımızda gördüklerimiz arasındaki bağlantı konusunda hiçbir şey söylemez. O nedenle, kuantum mekaniğinin kurucuları, matematiksel şekilciliğin zeyilnamesi haline gelmiş, amaca özel bir dizi kural koymuştur. "Kuantum postülatları" olarak bilinen bu kurallar, denklemlerden çıkan matematiksel öngörülerin, bir atomun belli bir zamandaki konumu ya da enerjisi gibi gözlemleyebildiğimiz somut özelliklerine nasıl tercüme edileceğini anlatan bir kullanım kılavuzu işlevi görür.

Ona baktığımız anda bir atomun aynı anda "*hem* orada *hem* burada" olmaktan vazgeçip sadece "burada" olmasını sağlayan asıl süreçte neler olup bittiğiniyse kimse bilmiyor ve fizikçilerin çoğu "öyle oluyor işte" şeklindeki pragmatik bakış açısını benimsemekten gayet memnun. Sorun şu ki, bu durum garip şeylerin gerçekleştiği kuantum dünyasıyla, cisimlerin "aklı başında" davrandığı günlük makrodünyamız arasında keyfi bir ayrım yapmayı gerektiriyor. Elektronu saptayan bir ölçüm cihazı bu makrodünyanın bir parçası olmak zorunda. Ancak bu ölçüm işleminin *nasıl*, *niçin* ve *ne zaman* gerçekleştiği, kuantum mekaniğinin kurucuları tarafından hiçbir zaman açıklığa kavuşturulmamıştır.

1980'li ve 90'lı yıllarda fizikçiler, çift yarık deneyindeki tek bir atom gibi izole bir kuantum sisteminde, atomun aynı anda iki yerde birden süperpozisyon halinde bulunabildiği dalga fonksiyonu, sözgelimi sol taraftaki yarığın üstüne yerleştirilmiş makroskobik bir ölçüm cihazıyla etkileştiğinde neler olup bittiğini kavramaya başladılar. Anlaşılan, atomun saptanması (burada, atomun *saptanmamasının* bile, diğer yarıktan geçmiş olduğuna işaret ettiği için bir ölçüm olarak görüldüğüne dikkat edin), onun dalga fonksiyonunun ölçüm cihazındaki trilyonlarca atomla etkileşmesine neden olmaktadır. Bu karmaşık etkileşim, hassas kuantum uyumluluğunun çabucak silinmesine ve çevredeki uyumsuz gürültü içinde yitip gitmesine neden olur. İşte bu, ikinci bölümde karşılaştığımız, uyumsuzluk denen sürecin ta kendisidir.

Fakat uyumsuzluğun etkisini göstermesi için ölçüm cihazına ihtiyaç yoktur. Uyumsuzluk, kuantum bileşenleri (atomlar ve moleküller) termal titreşimler gösterir ve etraftaki atomlar ve moleküllerle boğuşurken, dalga benzeri uyumluluğunu kaybeden her klasik cismin içinde her an gerçekleşmektedir. Bu anlamda uyumsuzluğu, belli bir atomun etrafındaki bütün maddenin, yani atomun içinde bulunduğu ortamın, o atomu sürekli olarak *ölçme* ve klasik bir parçacık gibi davranmaya zorlama yolu olarak düşünebiliriz. Gerçekten

de uyumsuzluk, fizikteki en hızlı ve en verimli süreçlerden biridir. Ve tam da bu çarpıcı verimliliğinden ötürü keşfedilmesi bu kadar uzun sürmüştür. Fizikçiler uyumsuzluğu nasıl kontrol edeceklerini ve inceleyeceklerini daha yeni yeni öğreniyorlar.

Suya çakıl taşı atma analojimize geri dönersek, taşları durgun bir göle attığımızda, birbiriyle girişim yapan dalgaları kolayca görebiliriz. Ama aynı taşları Niagara Şelalesi'nin döküldüğü suya atmayı deneyin bir de. Bu ortamda suyun son derece karmaşık ve kaotik doğası, çakıl taşlarından kaynaklanan herhangi bir girişim desenini ânında siler. Bu türbülanslı su, bir kuantum sisteminin etrafında gelişen ve derhal uyumsuzluğa yol açan gelişigüzel moleküler hareketlerin klasik dünyadaki eşdeğeridir. Moleküler düzeyde çoğu ortam, en az Niagara Şelalesi'nin döküldüğü yerde olduğu kadar türbülanslıdır. Maddelerin içindeki parçacıklar, bulundukları ortam (diğer atomlar, moleküller ya da ışık fotonları) tarafından sürekli itilip kakılır.

Bu noktada, kitapta kullandığımız terminolojinin bir kısmını açıklığa kavuşturmalıyız. Atomların aynı anda iki yerde birden bulunmasından, yayılan dalgalar gibi davranmasından ve aynı anda iki ya da daha fazla durumda süperpozisyon halinde var olmasından söz ediyoruz. Bütün bunları sizin açınızdan daha kolay anlaşılır kılmak için, bu kavramların hepsini kapsayan tek bir terimle yetinebiliriz: kuantum "uyumu". Böylece "uyumlu" etkilerden bahsettiğimizde, bir şeyin kuantum mekaniğine göre davrandığını, dalga benzeri davranış sergilediğini ya da aynı anda birden fazla şey yapabildiğini kast ediyoruz. Dolayısıyla "uyumsuzluk" da uyumluluğun kaybolduğu ve kuantumun klasiğe dönüştüğü fiziksel süreçtir.

Hassas uyumu korumak için kuantum sisteminin çevresinden yalıtıldığı (itişip kakışan parçacık sayısının daha az olduğu) ve/veya çok düşük bir sıcaklığa kadar soğutulduğu (itiş kakışın daha az olduğu) durumlar haricinde, kuantum uyumunun çok kısa ömürlü olması beklenir. Gerçekten de, bilim insanları tek tek atomların

girişim desenlerini göstermek için cihazın içindeki bütün havayı dışarı çeker ve teçhizatı mutlak sıfıra yakın bir dereceye dek soğutur. Ancak bu uç düzeydeki önlemleri alarak atomları, girişim desenlerini gösterebilmeye yetecek kadar uzun bir süre sakin kuantum uyumlu durumda tutabilirler.

Kuantum uyumunun hassasiyeti meselesi (dalga fonksiyonunun çökmeden korunabilmesi), bu bölümün giriş paragraflarında karşılaştığımız MIT grubunun ve bütün dünyadaki meslektaşlarının, bir kuantum bilgisayarı yapmaya çabalarken yüz yüze geldikleri başlıca zorluktu hiç şüphesiz ve bitkilerin kuantum bilgisayarları olduğunu iddia eden *New York Times*'a bu denli şüpheci yaklaşmalarının sebebi de buydu. Fizikçiler, bilgisayarlarının içindeki kuantum dünyasını, kuantum uyumunu yerle bir eden dış dünyadan korumak için her türlü akıllıca ve pahalı taktiği denerler. O nedenle, bir gıdım otun içindeki sıcak, ıslak ve moleküler açıdan türbülanslı ortamda kuantum uyumunun korunabildiği fikrinin çılgınca olduğunu düşünmeleri gayet anlaşılabilir bir durum.

Ancak moleküler düzeyde, pek çok önemli biyolojik sürecin gerçekten de çok hızlı gelişebildiğini (saniyenin trilyonda biri mertebesinde) ve kısa atomik mesafelerle sınırlı olabildiğini artık biliyoruz. Bunlar, tam da tünelleme gibi kuantum süreçlerinin etki gösterebileceği türde uzunluk ve zaman ölçekleridir. Öyleyse, uyumsuzluk asla bütünüyle engellenemezse de, biyolojik açıdan fayda sağlamaya yetecek kadar uzun süre uzak tutulabilir.

Fotosentezin merkezine seyahat

Bir saniyeliğine gökyüzüne baktığınızda 186.000 mil uzunluğunda bir ışık huzmesi gözünüze doğru iner. Aynı saniye içinde dünyadaki bütün bitkiler ve fotosentetik mikroplar, güneşten gelen ışık sütununu toplayarak ağaç, ot, yosun, papatya, dev sekoya ve elma şeklinde yaklaşık 16.000 ton ağırlığında yeni organik madde üretir. Bu bölümde amacımız, cansız maddenin gezegenimizdeki biyokütlenin

neredeyse tamamına dönüşümü sırasında gerçekleşen ilk basamağın nasıl işlediğini incelemek; ele alacağımız örnek, New England havasının Newton'un ağacındaki elmaya dönüşümü olacak.

Sürecin nasıl işlediğini yakından görebilmek için, geçen bölümde enzim işleyişini incelerken kullandığımız nanoteknoloji denizaltısını bir kez daha ödünç alacağız. Güverteye çıkıp minyatürleştirme düğmesine basar basmaz aracınız gökyüzüne yükselip ağacın yaprakları arasına dalıyor; sonunda aracınız yaklaştıkça genişliyormuş gibi görünen yapraklardan birine iniş yapıyorsunuz. Yüzey genişlemeye devam ediyor, ta ki yaprağın kenarları ufuk çizgisinin ardında kaybolup da görünürde pürüzsüz olan yüzey, yeşil renkli dikdörtgen tuğlalarla örülü, aralarda her birinin ortasında küçük bir delik bulunan daha soluk renkli yuvarlak blokların yer aldığı, çiçekbozuğu görünümlü düzensiz bir platforma dönüşene kadar. Yeşil tuğlalara epidermis hücreleri, yuvarlak bloklara ise stoma (gözenek) denir. Bunların işlevi hava ve suyun (fotosentezde kullanılan substratlar) yaprağın yüzeyinden içeriye girişini sağlamaktır. Gemiyi en yakın stomaya doğru sürüyorsunuz ve aracın uzunluğu bir mikrona (bir metrenin milyonda biri) indiğinde, pruvasını aşağıya yönlendirip gözenekten içeri dalıyor, yeşil ve aydınlık bir ortama giriyorsunuz.

İçeri girince, yaprağın, zemini kaya benzeri yeşil hücrelerle, çatısı kalın silindirik kablolarla döşeli iç ortamındaki ferah ve nispeten dingin alana geliyorsunuz. Bu kablolar yaprağın *damarlarıdır*; ksilem damarları köklerden yaprağa su taşırken, floem damarları yeni yapılan şekeri yapraktan bitkinin diğer yerlerine taşır. Siz küçüldükçe, kaya görünümlü hücrenin yüzeyi her yönde genişliyor, ta ki bir futbol sahası büyüklüğünde görünene dek. Bu ölçekte –artık boyunuz 10 nanometre, yani bir milimetrenin yüz binde biri kadar– üzeri lif lif iplerden oluşmuş bir hasır örgüyle kaplı yüzeyinin kalın bir kenevir halıyı andırdığını görebilirsiniz. Bu örgülü yapı, bir tür hücresel dış iskelet olan *hücre duvarıdır*. Nanodenizaltınızın donanımıyla kendinize bu lifli halının içinde yol açtığınızda

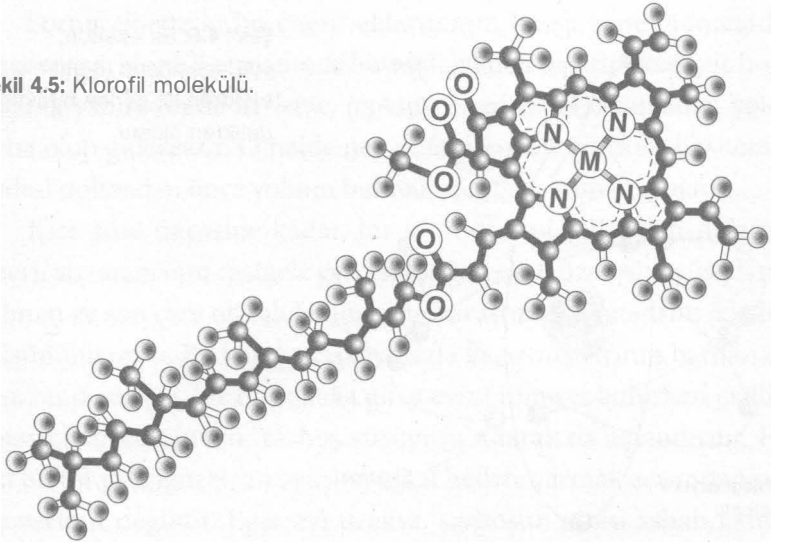
alttan mumsu bir tabaka, hücre ile dışındaki ortam arasındaki su geçirmez son engel olan hücre zarı çıkıyor. Daha yakından bakınca hücre zarının tamamen pürüzsüz olmadığını, suyla dolu çukurlardan ötürü çiçekbozuğu görünümümde olduğunu fark ediyorsunuz. Zardaki bu kanallara *porin* denir; besin maddelerinin içeri girişini ve artıkların dışarı çıkışını sağlayan bu kanallar hücrenin tesisatıdır. Hücrenin sulu ortamına girmek için porinlerden birinin yanında durup, içeri dalmanıza imkân verecek kadar genişlemesini beklemeniz gerek.

Porin kanalından geçer geçmez, hücre içi ortamın dışarıdan çok farklı olduğunu hemen fark edeceksiniz. Burada görkemli sütunlar ve geniş alanlar yok, tam tersine içerisi kalabalık ve biraz dağınık. Anlaşılan, burada işler çok yoğun! Hücreyi dolduran, *sitoplazma* denen sıvı yoğun ve kıvamlı, hatta yer yer sıvıdan çok jöleyi andırıyor. Bu jölenin içinde, içi hep hareketliymiş gibi görünen biçimsiz yumrular şeklinde binlerce cisim asılı durmakta. Bunlar, geçen bölümde karşılaştığımız, hücrelerin metabolik süreçlerini yürütmekten, besin maddelerinin parçalanmasından ya da karbonhidratlar, DNA, protein ve yağlar gibi biyomoleküllerin yapımından sorumlu olan protein yapısında enzimlerdir. Bu enzimlerin birçoğu, yükleri hücrenin çeşitli yerlerine çekerek taşıyan telesiyej benzeri bir kablolar ağına (*hücre iskeleti*) bağlıdır. Bu taşıma ağı, kabloların bağlandığı büyük yeşil kapsüllerdeki merkezlerden çıkıyormuş gibi görünür. Bu kapsüller hücrede fotosentezle ilgili en önemli olayların gerçekleştiği *kloroplastlardır.*

Denizaltınız kıvamlı sitoplazmanın içinde yavaş yavaş ilerliyor ama sonunda en yakın kloroplasta ulaşıyorsunuz. Tam altınızda dev bir yeşil balon gibi duruyor. Tıpkı içinde bulunduğunuz hücre gibi onun da saydam bir zarla çevrili olduğunu ve içinde üst üste istiflenmiş yeşil renkli bozuk para gibi cisimler bulunduğunu görüyorsunuz. Bunlar, bitkilere yeşil rengini veren pigment olan klorofil molekülüyle dolu *tilakoidler*. Fotosentezin motorları olan tilakoidler, ışık fotonlarının enerjisiyle (havadaki karbondioksitten gelen)

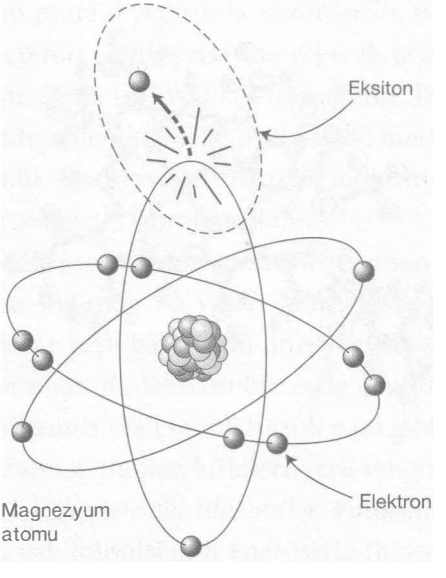
karbon atomlarını bir araya getirip elmamızın yapısına katılacak şekerleri oluşturur. Fotosentezin ilk basamağını daha iyi görebilmek için gemiyi kloroplast zarındaki deliklerden birinden geçiriyor, sonra da tilakoid yığınını oluşturan bozuk para benzeri yeşil nesnelerden en üsttekine doğru yönlendiriyorsunuz. Sonunda geldiniz; geminin motorunu durdurup aracınızla fotosentezin dinamosu üzerinde salınıyorsunuz.

Altınızda dünyanın biyokütlesini üreten trilyonlarca fotosentez makinesinin yalnızca biri var. Bulunduğunuz noktadan, geçen bölümde enzimin işleyiş mekanizmasını incelerken de gördüğümüz üzere, etrafınızda, bilardo toplarında olduğu gibi çok sayıda türbülanslı moleküler çarpışma gerçekleştiği halde, aynı zamanda etkileyici bir düzen de olduğunu görebilirsiniz. Tilakoid zarının yüzeyinde bulunan yeşil kayalık adaları kaplayan ormanın ağaç benzeri yapıları antenimsi beşgen plaklarla sonlanır. Bu anten plaklar ışığı toplayan ve en bilinen örneği klorofil olan *kromofor* adlı moleküllerdir; fotosentezin ilk kritik adımını bu moleküller gerçekleştirir: ışığı yakalama.



Şekil 4.5: Klorofil molekülü.

Gezegenimizdeki muhtemelen (DNA'dan sonra) en önemli ikinci molekül olan klorofil biraz daha yakından incelenmeyi hak ediyor (şekil 4.5). Merkezindeki magnezyum atomunu (M) çevreleyen, çoğunlukla karbon (gri küreler) ve azot (N) atomlarının oluşturduğu beşgen dizileriyle, karbon, oksijen (O) ve hidrojen (beyaz) atomlarından oluşan uzun bir kuyruktan meydana gelen iki boyutlu bir yapıdır. Magnezyum atomunun en dış yörüngesindeki elektron, atomun geri kalanına çok gevşekçe bağlıdır ve bir fotonluk güneş enerjisinin soğurulmasıyla bu elektron atomun çevresindeki karbon kafese sokulur, ve artık pozitif yüklü olan atomda bir boşluk bırakır. Bu boşluk, veya elektron deliği, biraz soyut bir ifadeyle kendi başına bir "şey", pozitif yüklü bir delik olarak düşünülebilir. Yapmak istediğimiz şu: Geride kalan magnezyum atomunu nötr varsayacak, fotonun soğurulmasıyla kaçan negatif elektron ve geride bıraktığı pozitif delikten oluşan bir sistem yaratacağız. Bu ikili sisteme *eksiton* denir (bkz. şekil 4.6). Bir eksitonu, daha sonra kullanılmak üzere enerji depolayan, artı ve eksi kutupları olan minicik bir pil gibi düşünebilirsiniz.



Şekil 4.6: Bir eksiton, yörüngesinden fırlatılmış bir elektron ile geride bıraktığı delikten oluşur.

Eksitonlar kararlı değildir. Elektron ile deliği birbirini elektrostatik güçle çeker. Eğer yeniden bir araya gelirlerse, baştaki fotonun güneş enerjisi, ısı olarak kaybedilir. O nedenle bitki eğer yakaladığı güneş enerjisinden faydalanacaksa, eksitonu yük ayrışması denen bir sürecin gerçekleştiği, *tepkime merkezi* olarak bilinen üretim birimine çabucak nakletmelidir. Bu süreç esasen, enerji yüklü bir elektronun atomundan tamamen ayrılması ve geçen bölümde gördüğümüz enzimatik hadisede olduğu gibi komşu bir moleküle aktarılmasıyla gerçekleşir. Bu işlem, çok önemli fotosentetik kimyasal tepkimeleri yürütmekte kullanılan ve eksitona göre daha kararlı olan, NADPH denen bir kimyasal pil oluşturur.

Fakat tepkime merkezleri uyarılmış klorofil moleküllerinden, moleküler ölçekte bakıldığında bir hayli (nanometrelerce) uzaktır, dolayısıyla enerjinin tepkime merkezine ulaşabilmesi için klorofil ormanında bir anten molekülden bir başkasına aktarılarak ilerlemesi gerekir. Neyse ki klorofilin sıkı paketlenmiş yapılar halinde bulunması sayesinde bu mümkün olur. Fotonu soğuran klorofile komşu moleküller de uyarılabilir, yani ilk uyarılan elektronun enerjisini devralır ve sonra kendi magnezyum atomlarının elektronuna naklederler.

Sorun elbette ki bu enerji aktarımının hangi yöne gideceğidir. Eğer enerji, klorofil ormanında bir molekülden diğerine rastgele hoplayarak yanlış yönde ilerlerse, tepkime merkezine varamadan yolda heba olup gidecektir. O halde ne tarafa dönmesi gerekir? Eksitonun vadesi dolmadan önce yolunu bulmak için fazla zamanı yoktur.

Kısa süre öncesine kadar, bir klorofil molekülünden diğerine enerji sıçramasının rastgele gerçekleştiği, gelişigüzel yürüyüş olarak bilinen ve son çare olarak benimsenen araştırma stratejisini izlediği düşünülüyordu. Bu hareket, içkiyi fazla kaçırmış birinin bardan çıkıp, bir o sokağa, bir bu sokağa girip evini nihayet bulurken çizdiği rotaya benzediğinden "sarhoş yürüyüşü" olarak da adlandırılır. Fakat bu tür gelişigüzel yürüyüşler, nihai hedefe varmak açısından pek de verimli değildir. Eğer evi uzaksa, sarhoşun ertesi sabah kentin

diğer ucunda bir çalılığın içinde uyanması işten bile değildir. Gelişigüzel yürüyen bir nesnenin, başlangıç noktasına göre kat ettiği mesafe, yürürken harcadığı zamanın kareköküyle orantılıdır. Örneğin, sarhoş bir dakikada bir metre ilerlediyse, dört dakika sonra iki metre ve dokuz dakika sonra sadece üç metre yol almış olacaktır. Bu ilerlemenin ağır aksaklığına bakacak olursak, hayvanların ve mikropların yiyecek bulmak ya da avlanmak için gelişigüzel yürüyüşü pek nadiren kullanması ve sadece başka seçenek kalmadığında son çare olarak bu stratejiye başvurması hiç de şaşırtıcı değildir. Bir karıncayı hiç bilmediği bir yere bırakın; bir koku yakaladığı anda gelişigüzel yürümeyi bırakıp kokunun izini sürecektir.

Ne kokunun izini sürecek bir burnu ne de navigasyon becerileri olan eksiton enerjisinin klorofil ormanında sarhoş stratejisiyle ilerlediği düşünülüyordu. Ancak fotosentezdeki ilk olayın olağanüstü verimli bir basamak olduğu bilindiğinden böylesi bir strateji pek makul gelmiyordu. Gerçekten de, yakalanan foton enerjisinin bir klorofil anten molekülünden tepkime merkezine aktarılması, bilinen bütün doğal ve yapay tepkimeler arasında en yüksek verime (%100'e yakın) sahiptir. Optimum koşullarda, bir klorofil molekülünün soğurduğu hemen her enerji paketi tepkime merkezine ulaştırılır. Eğer kat edilen yol dolambaçlı olsaydı, enerjinin çoğu, hatta neredeyse bütünü kaybolup giderdi. İşte bu fotosentetik enerjinin varacağı noktaya ilerlerken yolunu nasıl olup da sarhoşlardan, karıncalardan, hatta en enerji-verimli teknolojimizden daha kolay bulabildiği meselesi biyolojinin en büyük bilmecelerinden biri olagelmiştir.

Kuantum vuru

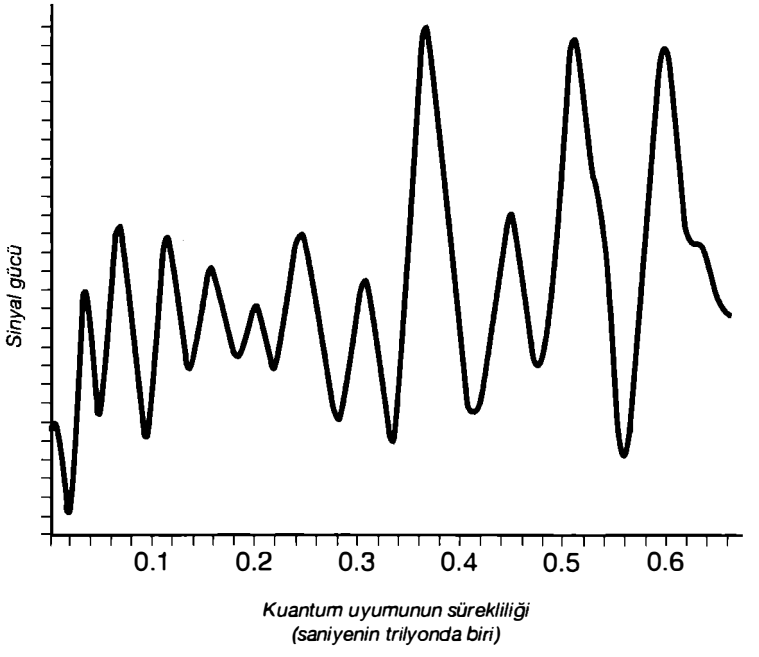
MIT dergi kulübünün gülmekten yerlere yattığı gazete yazısına ilham kaynağı olan araştırma makalesinin[3] kıdemli yazarı Graham Fleming'di. 1949'da İngiltere'nin kuzeyinde, Barrow'da dünyaya gelen, daha sonra Amerikan vatandaşlığına geçmiş olan Fleming şimdi Kaliforniya Berkeley Üniversitesi'nde, bu alanda dünyanın

önde gelen araştırma ekiplerinden biri olarak bilinen ve etkileyici adıyla güçlü bir teknik olan "iki boyutlu Fourier dönüşümü elektronik spektroskopisi"ni (2D-FTES) kullanan grubun başındadır. 2D-FTES, en küçük moleküler sistemlerin iç yapısını ve dinamiğini, yüksek derecede odaklanmış kısa süreli lazer atımlarıyla inceler. Grubun çalışmalarının çoğu bitkiler üzerine olmayıp, Fenna-Matthews-Olson (FMO) proteini olarak bilinen, Karadeniz gibi kükürtten zengin suların derinliklerinde yaşayan ve fotosentez yapabilen yeşil kükürt bakterileri tarafından yapılan bir fotosentez kompleksiyle ilgilidir. Araştırmacılar, klorofil numunesini incelemek için fotosentetik komplekslere peş peşe üç kez lazer ışığı göndermişlerdir. Bu lazer atımları, enerjilerini çok hızlı ve zamanlaması çok kesin olan patlamalar halinde bırakır ve numuneden, detektörler tarafından saptanan bir ışık sinyali yayılmasına neden olur.

Makalenin başyazarı olan Greg Engel, 50 ila 600 femtosaniye* süreli sinyallerden elde ettikleri verileri bütün bir gece boyunca bir araya getirmeye çalıştı ki sonuçların bir grafiğini çizebilsin. Engel, en az altı yüz femtosaniye boyunca bir yükselip bir alçalarak salınım yapan bir sinyal buldu (bkz. şekil 4.7). Bu salınımlar, çift yarık deneyindeki aydınlık ve karanlık şeritlerden oluşan girişim desenine ya da bir enstrümanı akort ederken duyulan titreşen ses vurularının kuantum eşdeğerine çok yakındır. Bu "kuantum vuru" eksitonun klorofil labirentinde tek bir rota izlemek yerine aynı anda pek çok güzergâhı takip ettiğini göstermektedir (şekil 4.8). Bu alternatif rotalar, nerdeyse akort edilmiş bir gitardan duyduğumuz titreşen notalar gibi davranır: Uzunlukları birbirine çok yakınken vurular oluşturur.

Ancak böylesi bir kuantum uyumunun çok hassas ve korunması olağanüstü zor olduğunu unutmayın. Bir mikrobun ya da bitkinin, uyumsuzluğu uzak tutma konusunda MIT'nin en zeki ve en iyi kuantum hesaplama araştırmacılarının kahramanca çabalarını geride

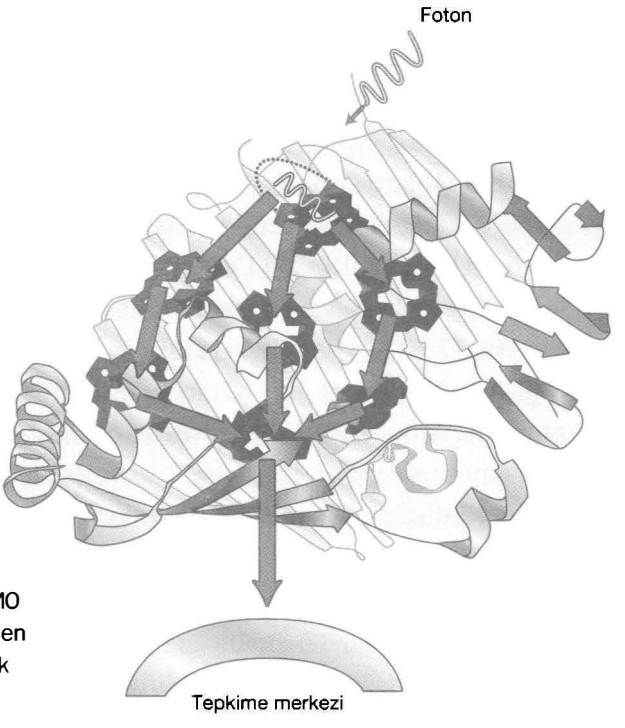
* Bir femtosaniye, bir saniyenin milyarda birinin milyonda biri kadar, yani 10-15 saniyedir.



Şekil 4.7: Graham Fleming ve meslektaşlarının 2007 yılındaki deneyde gördüğü kuantum vurular. Salınımların düzensiz olmasının bir önemi yok; asıl önemli olan salınımların görülmesi.

bırakması gerçekten mümkün müydü? MIT dergi kulübündekilerin tepesinin tasını attıran, Seth Lloyd'un "kuantum dalaveresi" olarak ifade ettiği, Fleming'in makalesindeki cüretkâr iddia buydu işte. Berkeley grubu, FMO kompleksinin tepkime merkezine giden en kısa yolu bulmak için bir kuantum bilgisayar gibi davrandığını öne sürüyordu ki bu, matematikte birkaç yerden fazlasını kapsayan yolculuk planlarının sadece çok güçlü bir bilgisayarla çözülebildiği ünlü gezgin satıcı problemine eşdeğer zorlukta bir optimizasyon problemiydi.*

* Gezici satıcı problemi, çok sayıda şehirden geçen en kısa yolu bulmakla ilgilidir. Bu, matematiksel olarak *NP-zorluğunda problemdir*, yani kuramsal olarak dahi kestirmeden çözüme ulaşılamaz ve optimum çözüme ulaşmak için yoğun bir hesaplama ve zahmetli bir aramayla olası bütün güzergâhların gözden geçirilmesi gerekir.



Şekil 4.8: Eksiton FMO proteininden geçerken aynı anda birden çok rota izler.

Konuya şüpheyle yaklaşmalarına karşın dergi kulübü Seth Lloyd'a bu iddiayı araştırma görevini verdi. Lloyd'un bilimsel dedektifliğinin sonucunda Kaliforniya grubunun iddialarının asılsız olmadığının anlaşılması MIT'deki herkesi şaşkına çevirdi. Fleming'in grubunun FMO kompleksinde bulduğu vurular gerçekten de kuantum uyumunun imzasıydı ve Lloyd, klorofil moleküllerinin, yeni bulunan *kuantum yürüyüş* adlı bir arama stratejisiyle çalıştığı sonucuna varmıştı.

Kuantum yürüyüşün, klasik gelişigüzel yürüyüşe üstünlüğünü anlamak için yavaş hareket eden sarhoş örneğimize geri dönelim; diyelim ki ayrıldığı barı su bastı ve kapıdan gürül gürül su boşalıyor. Tek bir rota seçmesi gereken sarhoşumuzun tersine, bardan çıkan su dalgaları olası bütün yönlerde ilerler. Su dalgaları sokaklarda zaman ile (zamanın karekköküyle değil) orantılı bir hızla ilerlerken

sarhoşumuz çok geçmeden geride kalacaktır. Su dalgaları bir saniyede bir metre mesafe kat ederse, iki saniyede iki metre, üç saniye sonra üç metre vb. ilerleyecektir. Hepsi bu kadar değil; çift yarık deneyinde süperpozisyon durumundaki atoma benzer şekilde, olası bütün güzergâhlarda eşzamanlı ilerleyecektir ve dalganın bir bölümü, sarhoş adamın evine kendisinden önce ulaşacaktır.

Fleming'in makalesi MIT'deki dergi kulübünün ötesine taşan bir hayret ve şok dalgası yarattı. Fakat yorumculardan bazıları, deneylerin 77 K'e (−196°C) soğutulmuş izole FMO kompleksleri kullanılarak yapıldığını fark etmekte gecikmedi. Bu, bitkilerdeki fotosentezle, hatta yaşamla bağdaşmayacak kadar soğuk bir ortamdı ama aynı zamanda şu baş belası uyumsuzluğu uzak tutmak için de yeterince düşük bir sıcaklıktı. Bu dondurulmuş bakteriler, bitki hücrelerinin sıcak ve karışık iç ortamında olan bitenle ne kadar alakalı olabilirdi ki!

Ancak çok geçmeden kuantum uyumunun soğuk FMO kompleksleriyle sınırlı olmadığı anlaşıldı. 2009'da University College Dublin'den Ian Mercer, bitkilerin ve mikropların fotosentez yaptığı normal sıcaklıklarda, Işık Toplayıcı Kompleks II (Light Harvesting Complex II: LHC II) adı verilen, bitkilerdekine çok benzer bir başka bakteriyel fotosentez sisteminde de (kısaca fotosistem) kuantum vurular saptadı.[4] Derken 2010 yılında Ontario Üniversitesi'nden Greg Scholes, yüksek yapılı bitkilerden farklı olarak kök, gövde ve yaprakları bulunmayan, buna karşılık olağanüstü miktarlarda bulundukları için atmosferdeki karbonun sabitlenmesinde (yani atmosferden karbondioksit çekmede) yüksek yapılı bitkiler kadar rolü olan, kriptofit adlı bir grup suyosununda da kuantum vuruların var olduğunu gösterdi.[5] Yaklaşık aynı dönemde Greg Engel, daha önce Graham Fleming'in laboratuvarındayken incelediği FMO kompleksinde kuantum vuruların varlığını, bu kez yaşamla bağdaşan çok daha yüksek sıcaklıklarda gösterdi.[6] Bu dikkat çekici fenomenin sadece bakteriler ve alglerle sınırlı olduğunu sanmayın; zira Fleming'in Berkeley'deki laboratuvarında çalışan Tessa Calhoun ve

meslektaşları kısa süre önce ıspanaktaki bir başka LHC2 sisteminde kuantum vurular saptadılar.[7] LHC2 bütün yüksek yapılı bitkilerde bulunur ve gezegenimizdeki klorofilin yüzde 50'sini içerir.

Daha fazla ilerlemeden önce, Feynman'ın tasviriyle "oksijeni karbondan koparıp fırlatan ... geriye ağacın maddesini" (ya da elmanınkini) "oluşturmak üzere karbon ve su" kalmasını sağlayan güneş kaynaklı bu uyarılma enerjisinin nasıl kullanıldığına kısaca göz atalım.*

Tepkime merkezine yeterli enerji ulaştığında, bu enerji özel bir çift klorofil molekülünden (P680) elektron kopmasına neden olur. Tepkime merkezinde neler olup bittiğini onuncu bölümde biraz daha ayrıntılı öğreneceğiz, zira burası bir başka kuantum olayına daha ev sahipliği yapan, hayranlık uyandırıcı bir yer. Burada sözünü ettiğimiz elektronların kaynağı sudur (hatırlarsanız, Feynman'ın fotosentez tanımındaki bileşimde adı geçenlerden biri de suydu). Geçen bölümde gördüğümüz gibi, bir maddeden elektronların koparılmasına oksidasyon diyoruz; yanma sırasında gerçekleşen olay da budur. Örneğin; havayla temas halinde olan tahta yanarken, oksijen atomları karbon atomlarından elektron çeker. Karbonun dış yörüngesindeki elektronlar oldukça gevşek bir bağlanma gösterdiği için karbon kolayca yanar. Buna karşılık, sudaki elektronlar çok sıkı tutuludur; ve fotosentez sistemleri, *suyun* "yanarak" elektron verdiği, doğada eşi benzeri olmayan tek örnektir.**

Buraya kadar her şey yolunda; artık elimizde, klorofildeki eksitonların sağladığı enerji sayesinde bir serbest elektron kaynağı var. Bir sonraki aşamada bitkinin bu elektronları işe koşulabilecekleri yere göndermesi gerek. Elektronlar ilk önce hücrenin elektron taşıyıcısı olan NADPH tarafından tutulur. Şekerler ve benzeri besin maddelerinden yakaladıkları elektronları hücrenin enerji üreten

* Aslında Feynman'ın tasviri doğru değil çünkü fotosentez sırasında oksijen karbondan koparılmaz.

** "Suyun yanması" dediğimizde elbette suyun kömür gibi bir "yakıt" olduğunu kast etmiyoruz; bu terimi daha serbest anlamıyla molekülün oksidasyon sürecini ifade etmek için kullanıyoruz.

organeli mitokondrideki solunum zinciri enzimlerine taşımakla görevli benzer bir molekül olan NADH ile son bölümde tanışmıştık. Hatırlarsanız, NADH'nin yakalayıp mitokondriye taşıdığı elektronlar daha sonra, solunum zinciri enzimleri boyunca, protonları zardan pompalamak için kullanılan bir tür elektrik akımı halinde akıyor ve bu protonların geri akımı, hücrenin enerji taşıyıcısı olan ATP'nin yapımında kullanılıyordu. Bitki kloroplastlarında da ATP yapımında çok benzer bir süreç işler. NADPH elektronları, mitokondridekine benzer şekilde kloroplast zarından dışarı proton pompalayan bir enzim zincirine taşır. Bu protonların geri akışı ATP moleküllerinin yapımında, üretilen ATP de bitki hücresinde enerji gerektiren bir yığın işlemde kullanılır.

Ancak gerçek karbon sabitleme süreci, yani havadaki karbondioksitin yapısında bulunan karbon atomlarının yakalanması ve şekerler gibi enerjiden zengin organik moleküllerin yapımında kullanılması işlemi, tilakoidin dışında ama yine kloroplastın içinde gerçekleşir. Bunun gerçekleşmesini sağlayansa, yeryüzündeki en önemli işi üstelenerek dünya biyokütlesinin neredeyse bütününü ürettiği için herhalde dünyada en bol bulunan protein olan RuBisCO adlı büyük, yapılı enzimdir. Bu enzim, karbondioksitten çektiği karbon atomunu beş karbonlu bir basit şeker olan ribüloz-1,5-bisfosfata ekleyerek altı karbonlu bir şeker oluşturur. Bunu yaparken de iki şey kullanır: (NADPH tarafından sunulan) elektronlar ve bir enerji kaynağı (ATP). Bunların her ikisi de fotosentezin ışıkla yürütülen işlemlerinin ürünüdür.

RuBisCO tarafından üretilen altı karbonlu şeker derhal iki adet üç karbonlu şekere parçalanır; bunlar da daha sonra çeşitli biçimlerde bir araya getirilerek bir elma ağacının, meyveleri dahil, yapısındaki bütün biyomoleküllerin yapımında kullanılır. Böylece New England'ın cansız havası suyu, ışık ve bir tutam kuantum mekaniği yardımıyla New England'daki bir ağacın canlı dokusuna dönüşüverir.

Bitkilerdeki fotosentezi, geçen bölümde incelediğimiz, kendi hücrelerimizde gerçekleşen solunum (gıdaların yakılması) olayıyla karşılaştırdığınızda, hayvanlarla bitkilerin özde o kadar da farklı olmadığını görürsünüz. Aramızdaki esas ayrım, yaşamın temel yapıtaşlarını nereden elde ettiğimizdedir. Onların da bizim de karbona ihtiyacımız var. Ancak bitkiler karbonu havadan alırken, biz organik kaynakları, mesela bitkilerin kendisini kullanıyoruz. Onların da bizim de biyomoleküllerin yapımı için elektronlara ihtiyacımız var. Ancak biz elektron yakalamak için organik molekülleri *yakıyoruz*, bitkilerse elektronlarını tutmak için suyu *yakıyor*. Ve onların da bizim de enerjiye ihtiyacımız var. Biz enerjiyi, gıdalardan gelen yüksek enerjili elektronları solunum sürecinde enerji tepelerinden aşağı doğru koşturarak elde ederken, bitkiler güneşin fotonlarını yakalar. Bu işlemlerin her biri, kuantum kurallarına göre işleyen temel parçacıkların hareketiyle gerçekleşir. Görünüşe göre yaşamın, yoluna devam edebilmek için kuantum süreçlerinden yararlanması gerekiyor.

Bitkiler ve mikroplar gibi sıcak, ıslak, türbülanslı sistemlerde kuantum uyumunun keşfedilmesi, kuantum fizikçileri için büyük bir şok olmuştur ve yaşayan sistemlerin hassas kuantum uyumumu nasıl koruduğu ve ondan nasıl faydalandığını anlamaya yönelik yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Derin dondurucunuzda değil de çalışma masanızın üzerinde iş gören kuantum bilgisayarların yapımında MIT kuantum kuramcılarına ve diğer fizikçilere dahi yardımcı olabilecek şaşırtıcı bazı yanıtları inceleyeceğimiz onuncu bölümde bu bilmeceye geri döneceğiz. Ayrıca bu araştırma alanının yeni bir yapay fotosentez teknolojileri kuşağına ilham kaynağı olması pekâlâ mümkün. Günümüzde kullanılan solar hücreler az çok fotosentez ilkelerine dayanmakta olup, temiz enerji pazarında pay kapmak için daha şimdiden güneş panelleriyle rekabet halindedir; ancak solar hücrelerin verimi enerji taşınmasındaki kayıplardan ötürü sınırlıdır (fotosentezde foton enerjisinin yakalanması

basamağının yüzde 100'lük verimiyle karşılaştırıldığında, en iyi ihtimalle yüzde 70 civarında). Kuantum uyumunun biyolojiden esinlenerek solar hücrelere taşınması, daha temiz bir dünya için güneş enerjisinin verimini büyük ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

Bu bölümde son olarak, yaşamı bunca özel kılan şeye dair kavrayışımıza şimdiye kadar kattıklarımızın önemi hakkında bir durup düşünelim. Greg Engel'in, ilk olarak FMO kompleksi verilerinde gördüğü, parçacıkların canlı hücrelerde dalgalar halinde hareket ettiğini gösteren kuantum vuruları düşünün. Bunların sadece laboratuvar koşullarında gerçekleşen ama biyokimyasal deney ortamı dışında herhangi bir anlam taşımayan olaylar olduğunu düşünmeye meyilliyiz. Fakat araştırmalar bu olayların doğada, yaprakların, suyosunlarının ve mikropların içinde de gerçekleştiğini ve biyosferin inşasında muhtemelen vazgeçilmez bir rol oynadığını göstermiştir.

Yine de kuantum dünyası bize pek garip görünür ve genellikle bu garipliğin, çevremizde gördüğümüz dünya ile onun altında yatan kuantum temeller arasındaki yarılmanın bir belirtisi olduğu iddia edilir. Oysa gerçekte dünyanın işleyişini yöneten tek bir kurallar bütünü vardır: kuantum yasaları.* Aşina olduğumuz istatistiksel yasalar ve Newtoncu kanunlar nihayetinde, bütün garipliği ekarte eden uyumsuzluk merceğinden süzülerek geçmiş kuantum yasalarıdır (kuantum fenomeninin bize garip görünmesinin sebebi de budur zaten). Yeterince derine inerseniz, aşina olduğumuz gerçekliğin altında her zaman kuantum mekaniğinin yattığını görürsünüz.

Dahası, belli bazı makroskobik cisimler kuantum fenomenine *duyarlıdır* ve bunların çoğu canlıdır. Geçen bölümde, enzimlerde gerçekleşen kuantum tünellemenin hücrenin bütünü açısından nasıl bir fark yaratabildiğini gördük; bu bölümdeyse gezegenimizin biyokütlesinin büyük bölümünden sorumlu ilk olay olan foton

* Kütleçekimini anlamamızı sağlayan genel görelilik kuantum mekaniğiyle uyumsuz göründüğü için, kuantum mekaniğinin şimdiye dek kütleçekimi kuvvetini açıklayamadığı notunu düşelim. Kuantum mekaniğiyle genel göreliliği birleştirerek kütleçekiminin kuantum kuramını geliştirmek, fiziğin hâlâ yüz yüze olduğu en büyük zorluklardan biridir.

yakalamanın, bir yaprağın ya da mikrobun sıcak ama yüksek düzeyde organize iç ortamındaki hassas kuantum uyumunun biyolojik açıdan uygun süreler boyunca korunmasına nasıl bağlı olduğunu inceledik. Bir kez daha Schrödinger'in *düzenden doğan düzen* ilkesinin kuantum olaylarını ve Jordan'ın terimiyle kuantum fenomeninin makroskobik dünyaya *amplifikasyonunu* yakaladığını görüyoruz. Göründüğü kadarıyla kuantum sınırında tünemiş olan yaşam, kuantum dünyasıyla klasik dünya arasında köprü kurmaktadır.

Sonraki bölümde, biyosferimiz için büyük önem taşıyan bir başka sürece dikkat çekeceğiz. Şayet kuşlar ve böcekler, özellikle arılar, çiçeklerini tozlaştırmamış olsaydı, Newton'un ağacı bir tanecik bile elma veremezdi. Ama arılar öncelikle elma çiçeklerini bulmalıydı ve onlar da bunu, çoğumuzun inandığı gibi kuantum mekaniğinin yönettiği bir beceri olan koku duyusunun sayesinde yapabildiler.

5
Nemo'nun yuvasını bulmak

Örneğin, hiçbir filozofun derin bir saygı ve minnetle anmadığı burun, en azından şimdilik kullanımımıza sunulmuş en hassas araçtır: Spektroskopun bile saptayamayacağı derecede küçük değişimleri saptayabilir.
Friedrich Nietzsche, *Putların Alacakaranlığı*, 1889

Görünüşe göre bize madde gerçekliğinden belli bir mesaj getiriyorlar.
Gaston Bachelard, *La Formation de l'esprit scientifique, contribution à une psychoanalyse de la connaissance objective*, 1938

Filipinler'de Isla Verde açıklarındaki mercan resifine tutunmuş ölümcül denizşakayığının (anemon) kolları arasında, palyaço balığı, daha doğrusu anemon balığı, en doğrusu *Amphiprion ocellaris* adlı turuncu beyaz çizgili bir çift balık yaşıyor. Bunlardan biri –dişi olan– çoğu omurgalınınkinden çok daha ilginç bir hayat sürdü çünkü hep dişi olarak yaşamadı. Bütün anemon balıkları gibi o da hayata, o denizşakayığını mesken tutmuş balık grubundaki tek dişinin emrinde daha küçük bir erkek olarak başladı. Anemon balıklarının çok katı bir toplumsal yapılanması vardır ve bir erkek olarak bu balık, baskın erkek konumuna geçip de gruptaki tek dişiyle

çiftleşme şerefine nail olana kadar diğer erkeklerle rekabet halindeydi. Fakat dişisi civardan geçen bir yılanbalığına yem olunca, erkeğin vücudunda yıllarca uykuda kalan yumurtalıklar olgunlaştı, testisler işlevsizleşti ve erkek palyaço balığı, hiyerarşik düzene göre sırası gelen erkekle çiftleşmeye hazır kraliçeye dönüştü.

Anemon balıkları, Hint Okyanusu'ndan Batı Pasifik'e kadar uzanan mercan resiflerinin sık rastlanan sakinlerindendir; bitkiler, suyosunları, plankton, yumuşakçalar ve küçük kabuklularla beslenirler. Küçük cüsseleri ve canlı renkleri; diken, sivri yüzgeç ya da iğnelerinin olmaması onları resifte kol gezen yılanbalığı, köpekbalığı gibi yırtıcılar için kolay bir hedef haline getirir. Tehdit edildiklerinde başlıca savunma yöntemleri, kendilerine ev sahipliği yapan denizşakayığının dokunaçları arasına çekilerek saklanmaktır; pullarını örten mukus tabakası balığı şakayığın zehirli iğnelerine karşı korur. Karşılığında denizşakayığı da, otlanmaya gelen kelebek balığı gibi istenmeyen ziyaretçileri uzak tutan renkli kiracılarından faydalanır.

İşte *Kayıp Balık Nemo* animasyonundan tanıdığımız anemon balığının yaşadığı ortam böyle bir yer.* Filmde Nemo'nun babası Marlin'in derdi, Büyük Set Resifi'ndeki yuvasından ta Sydney'e dek sürüklenen oğlunu bulmaktı. Oysa gerçek anemon balıklarının asıl derdi eve dönüş yolunu bulmaktır.

Her denizşakayığı, baskın bir erkek ve dişi anemon balığıyla birlikte yaşayan ve kraliçenin hayat arkadaşı olabilmek için birbiriyle rekabet eden çok sayıda genç erkeğin oluşturduğu bir koloniye ev sahipliği yapabilir. Kraliçe ölünce baskın erkeğin cinsiyet değiştirebilmesini sağlayan, protandröz hermafroditlik olarak bilinen sıradışı beceri, üreyebilen tek dişinin ölümü üzerine koloninin, ev sahibi denizşakayığının korumasından çıkmak zorunda kalmaksızın tehlikeli resifte varlığını sürdürmesini sağlayan bir adaptasyon

* Ne yazık ki bu popülerlik, gelişen akvaryum pazarını beslemek için bu balıkları yakalayan avcıların gözdesi haline gelmiş hayvanın doğal yaşamını tehdit etmektedir. Yani evinizde Nemo beslemeyin; onun yeri gerçek mercan resifleri!

olabilir. Fakat bütün balık kolonisi tek bir denizşakayığını üzerinde yıllarca kalabilse de, bu balıkların yavruları güvenli yuva ortamını terk etmek ve eninde sonunda yuvaya dönüş yolunu bulmak zorundadır.

Dolunay, mercan resiflerinde yaşayan çoğu balık için yumurtlama işaretidir.* Ay okyanusun üzerinde batmaya başlarken, çiftin dişisi baskın erkeğin dölleyeceği yumurta kümeleri bırakmaya koyulur. Bundan sonra dişinin işi biter; yumurtaları koruyup kollamak ve resiflerin etçil balıklarını kovalamak erkek anemon balığının görevidir. Bir hafta süren muhafızlığın ardından yumurtalardan çıkan yüzlerce larva akıntıya kapılarak sürüklenmeye başlar.

Anemon balığı larvaları sadece birkaç milimetre uzunluğundadır ve neredeyse saydamdır. Yaklaşık bir hafta boyunca zooplanktonla beslenerek açık denizlerdeki akıntılarla sürüklenirler. Mercan resiflerinde dalış yapan herkesin bildiği üzere, okyanus akıntısı sizi kısa sürede başlangıç noktanızdan çok uzaklara sürükler; haliyle anemon balığı larvaları da doğdukları resiften kilometrelerce öteye taşınabilir. Çoğu, diğer canlılara yem olur ama bir kısmı hayatta kalmayı başarır; yaklaşık bir hafta sonra bu şanslı azınlık deniz tabanına iner ve bir gün içinde başkalaşım geçirerek (üçüncü bölümdeki kurbağa gibi), erişkin balığın daha küçük boyutlusu olan genç forma dönüşür. Zehirli denizşakayığının korumasından mahrum olan parlak renkli genç balık, derin sularda gezinen yırtıcıların saldırısı karşısında tamamen korumasızdır. Hayatta kalmak istiyorsa sığınabileceği bir mercan resifi bulmak zorundadır hemen.

Resifte yaşayan balık larvalarının okyanus akıntılarıyla sürüklendiği ve uygun bir resifin yakınına düşmelerinin tamamen şans eseri olduğu düşünülüyordu. Ancak çoğu larvanın gayet iyi yüzdüğü bilindiği için bu açıklama pek de mantıklı gelmiyordu; sonuçta, nereye gideceğinizi bilmiyorsanız yüzmenin ne anlamı var ki! Derken 2006 yılında, Massachusetts'teki ünlü Woods Hole Deniz

* Bu dönemde daha güçlü olan gelgit dalgalarının saçılmaya yardımcı olduğu düşünülüyor.

Biyolojisi Laboratuvarı'ndan araştırmacı Gabriele Gerlach, Avustralya Büyük Set Resifi'ni oluşturan kompleks içinde 3 ila 23 kilometrelik mesafelerle ayrılmış resiflerde yaşayan balıkların genetik parmak izini inceledi. Aynı resifte ikamet eden balıkların birbiriyle, daha uzak resifleri mesken tutmuş balıklarla olduğundan çok daha yakın akraba olduğunu buldu. Bütün balık larvaları uzak mesafelere saçıldığına göre, Gerlach'ın bulgusu sadece, erişkinlerin çoğunun doğdukları resife geri dönmesi durumunda anlam kazanır. Larvaların her biri her nasılsa, yumurtlama alanını tanımlayan bir imza ile damgalanmış olmalıdır.

İyi de, evinden onca uzaklara sürüklenen larvalar ya da genç balıklar hangi yönde yüzeceklerini nereden biliyor? Deniz tabanı faydalı olacak görsel ipuçları sunmaz pek. Referans noktalarından yoksundur ve ne tarafa baksanız aynı manzarayla karşılaşırsınız: oraya buraya serpiştirilmiş taşlar ve kayalarla dekore edilmiş, birkaç eklembacaklının gezindiği bir kum çölü. Uzaktaki mercan resifinin kilometrelerce öteye gidebilecek işitsel sinyaller göndermesi de pek mümkün gözükmüyor. Akıntılar da başlı başına bir sorun zaten çünkü akışın yönü derinliğe göre değişir, ayrıca su kütlesinin hareket halinde mi yoksa durağan mı olduğuna karar vermek çok zor olabilir. Anemon balığının, kızılgerdanımıza kış mevsimindeki göç sırasında kılavuzluk eden türde bir pusulası olduğuna dair kanıt da yok elimizde. O halde yolu nasıl buluyorlar?

Balıkların keskin bir koku duyusu vardır. Beyinlerinin üçte ikisi koku duyusuna ayrılmış olan köpekbalıkları, bir damla kanın kokusunu bir kilometre öteden alabilir. Resif balıkları eve dönüş yolunu koklayarak buluyor olamaz mı? Gabriele Gerlach bu kuramı sınamak için balık larvalarını deniz suyunun aktığı iki kanalın ağzına yerleştirdiği "iki kanallı koku seçimi testi"ni tasarladı. Kanallardan birinden akan su larvaların yumurtadan çıktığı resiften, diğerinden akan suysa uzaktaki bir resiften toplanmıştı. Gerlach larvaların hangi kanaldaki suyu tercih ettiğine baktı: Evden gelen su mu yoksa uzaklardan gelen mi?

Balık larvaları istisnasız her seferinde yumurtadan çıktıkları resiften gelen suyun olduğu tarafa yüzdüler. Doğdukları resifle yabancı resifin suyunu, muhtemelen kokularından açıkça ayırt edebiliyorlardı. Avustralya'nın Queensland kentindeki James Cook Üniversitesi'nden Michael Arvedlund adlı araştırmacı benzer bir deneyle anemon balıklarının, kendilerine ev sahipliği yapan şakayık türlerini, kolonize etmedikleri türlerden ayırabildiğini gösterdi. Daha da çarpıcı olan, yine James Cook Üniversitesi'nden Daniella Dixson'ın, anemon balıklarının tercih ettiği, üzerinde bitki örtüsü olan adaların altındaki resiflerden alınan su ile pek tercih etmedikleri açık denizdeki resif suyunu ayırabildiğini bulmasıydı. Anlaşılan o ki, Nemo ve diğer resif balıkları yuvaya dönüş yolunu gerçekten de koklayarak buluyor.

Hayvanların koku duyusuyla yön bulma becerileri dillere destandır. Her yıl, bütün dünyada milyonlarca somonbalığı yumurtlama sahalarına ulaşmak için nehrin yukarısına doğru yapacakları yolculukta akıntıya, ivintilere, şelalelere ve kum tepelerine karşı verecekleri tehlikeli mücadelenin hemen öncesinde büyük gruplar halinde okyanus kıyısındaki nehir ağızlarında toplanır. Anemon balıkları gibi somonbalıklarının da uygun nehri seçmesinin şans eseri olduğu düşünülüyordu. Fakat 1939'da Kanadalı Wilbert A. Clemens, Fraser Nehri'nin bir kolunda yakaladığı 469.326 genç somonbalığını işaretledi. Yıllar sonra işaretlediği balıklardan aynı nehir koluna dönen 10.958'ini yakaladı. İşaretli balıklardan tek bir tanesi bile nehrin bir başka kolunda yakalanmamıştı. Okyanustan doğdukları nehre, yuvaya dönerken hiçbiri yolunu kaybetmemişti. Okyanusta ve nehir boyunca yollarını nasıl buldukları konusu yıllarca gizemini korudu. Derken Wisconsin-Madison Üniversitesi'nden Profesör Arthur Hasler genç somonbalıklarının kokuyu takip ettiğini ileri sürdü ve 1954 yılında Seattle yakınlarındaki Issaquah Nehri'ndeki çatallanmada (iki akarsuyun birleşme noktası) yukarı doğru ilerleyen yüzlerce genç balığı yakalayıp çatalın aşağısına taşıyarak kuramını sınadı. Somonbalıkları çatalın hangi dalında yakalandılarsa,

her seferinde aynı yere döndüler. Fakat Hasler burun deliklerini pamukla tıkayınca balıklar nehirde yukarı, çatala doğru bir o yana bir bu yana yalpalayarak yüzmeye başladı ve sağa mı yoksa sola mı gideceklerine bir türlü karar veremediler.

Koku maddelerinin içinde seyreldiği atmosfer hacminin, okyanusunkinden çok daha büyük olduğu düşünülürse, koku duyusu karada belki daha da çarpıcıdır. Ayrıca atmosfer, hava koşullarına bağlı olarak daha çok türbülansa maruz kalır, dolayısıyla koku molekülleri havada, suda olduğundan daha çabuk yayılır. Çoğu kara hayvanının hayatta kalması açısından yaşamsal değeri olan koku duyusu sadece yuvaya dönüş yolunu bulmak için değil, avlanmak, yırtıcılardan kaçmak, eş bulmak, alarm sinyalleri göndermek, alan işaretlemek, fizyolojik değişimleri tetiklemek ve iletişim kurmak için de kullanılır. Koku duyusuna ilişkin bu *koku manzarası*, bu sinyalleri ve işaretleri saptamak için hayvan dostlarının keskin koku duyusundan faydalanan insanlar için bu kadar aşikâr değildir. Köpeklerin kokuya olan ilgisi meşhurdur ve koku epiteli (bu konuya daha sonra geleceğiz) bizimkinin kırk katı kadar olan "bloodhound" (kan tazısı) cinsi köpekler tek bir bireyin kokusunun izini sürebilmeleriyle haklı bir ün kazanmıştır. Kanun kaçağının geride bıraktığı gömleği şöyle bir kokladıktan sonra kötü adamın izini dere tepe sürebilen köpeğin rol aldığı filmleri hepimiz izlemişizdir. Bu öyküler kurmaca olsa da, tazının becerisi tamamen gerçektir. Köpekler bir izi takip ederek insanın ya da hayvanın ne tarafa doğru gittiğini bilebilir, günlerce önce bırakılmış bir kokunun dahi izini sürebilir.

Hayvanların koku duyusunun şaşırtıcı gücünü, bir kan tazısının ya da anemon balığının rutin olarak becerdiklerini düşünerek kavrayabiliriz. Önce "bloodhound" cinsi köpekleri ele alalım; koku duyusu, olağanüstü hassas burnu sayesinde, insanlar ve diğer hayvanların bıraktığı bütirik asit gibi organik kimyasalları, ortamda çok çok az miktarda bulunsa bile saptamaya ayarlıdır. Bir gramcık bütirik asit bir odada buharlaşsaydı, biz insanlar, onun o ekşimsi kokusunu ancak alabilirdik. Oysa bir köpek, aynı miktarda kimyasal

buharlaşıp 100 metre yüksekliğe kadar bütün bir şehrin havasına karışarak seyreltilse bile kokuyu alabilir. Şimdi de bir anemon balığının ya da somonbalığının kilometrelerce uzaktaki yuvasının engin okyanus suyunda seyrelmiş olan kokusunu nasıl aldığını bir daha düşünün.

Fakat hayvanların koku duyusunun tek çarpıcı tarafı duyarlılığı değildir. Aynı zamanda yüksek düzeyde gelişmiş bir ayırt etme gücü vardır. Gümrük memurları, marihuana ve kokain gibi uyuşturuculardan, C-4 gibi patlayıcılardaki kimyasallara varan geniş bir yelpazedeki çeşitli kokuları, defalarca sarılarak paketlenmiş ya da valize saklanmış olsa dahi saptayabilen köpekler kullanırlar. Köpekler bireylerin, hatta tek yumurta ikizlerinin dahi kokusunu ayırabilir. Peki ama bunu nasıl yapıyorlar? Hepimizin ortama saldığı bütirik asit aynı değil mi yoksa? Elbette aynı ama her birimiz bütirik asidin yanı sıra, tıpkı parmak izimiz gibi bize ait bir imza oluşturan, yüzlerce organik molekülden meydana gelmiş ince ve karmaşık bir kokteyl bırakıyoruz geride. Nasıl ki biz birinin gömlek rengini kolayca görebiliyorsak, bir köpek de kokusal parmak izimizi aynı derecede kolaylıkla "görebilir". Nasıl ki biz oturduğumuz sokağı tanıyor ya da sokak kapımızın rengini biliyorsak, benzer şekilde anemon balığı ve somonbalığı da yuvasının kokusunu tanıyor olsa gerek.

Ancak kokunun şampiyonları köpekler, somonbalıkları ya da anemon balıkları değildir. Bir ayının koku duyusu, "bloodhound"unkinden yedi kat hassastır; bir hayvan leşinin kokusunu 20 kilometre öteden alabilir. Bir pervane çiftleşeceği eşinin kokusunu 10 kilometre uzaktan alabilir; sıçanlar üç boyutlu olarak, yılanlarsa dilleriyle koku alır. Bütün bu kokusal yetiler yiyecek aramak, eş bulmak ve/veya yırtıcılardan kaçmak zorunda olan hayvanlar için elzemdir; bu hayvanlarda ister havada ister suda olsun, ait olduğu kaynağın ya da tehlikenin yakınlığını açık eden uçucu ipuçlarına karşı bir duyarlılık evrimleşmiştir. Koku duyusu hayvanın hayatta kalması için o denli önemlidir ki, kokulara karşı verilen

davranışsal yanıtlar kimi türlerde genetik olarak belirlenmiş gibi görünmektedir. Orkney Adası'nda yaşayan bir tarla faresi türü ile yapılan deneyler, bu hayvanların, gelincik salgıları bulaştırılmış yem konmuş tuzaklardan uzak durduğunu göstermiştir; adada beş bin yıldan beri gelincik bulunmadığı halde!

İnsanlarda koku duyusunun diğer hayvan akrabalarındakine göre çok daha zayıf olduğu söylenir. Birkaç milyon yıl önce *Homo erectus* belini doğrultup ormanda iki ayağı üzerinde yürümeye başladığında, burnunu da topraktaki zengin aroma kaynağından çekmiş oldu. Sonrasında, her ikisi de daha yüksek bir görüş noktasında daha etkili olan görüntü ve ses, başlıca bilgi kaynağı haline geldi. Dolayısıyla insanın burnu zamanla kısaldı, burun delikleri daraldı ve koku reseptörlerini kodlayan atasal memeli genlerinde binlerce mutasyon birikti (bu konuya daha sonra döneceğiz). Bu arada, belki de maalesef demek lazım, diğer hayvanlarda bulunan, seks feromonlarını saptamakla görevli, vomeronazal organ (VNO) ya da Jacobson organı olarak anılan yardımcı koku duyusunu da yitirdik.

Yine de hepsi hepsi üç yüz civarında koku reseptörü geninden ibaret güdükleşmiş genetik repertuarımıza ve değişmiş anatomimize rağmen, şaşırtıcı derecede iyi bir koku duyusuna sahibiz. Kilometrelerce öteden eşimizin ya da akşam yemeğinin kokusunu alamasak da, yaklaşık on bin farklı kokuyu ayırt edebiliyoruz ve Nietzsche'nin de belirttiği gibi kokulu kimyasalların "spektroskopik saptaması"nı geçebiliyoruz. Kokuların kıymetini bilmemiz en güzel şiirlerden bazılarına ilham vermiş olduğu gibi ("Gül dediğimiz şeyin adı başka olsa da gene güzel kokardı")* mutluluk ve memnuniyet hissimizde de önemli rol oynar.

Koku duyusu insanlık tarihinde de şaşırtıcı derecede etkin rol oynamıştır. Kadim metinlerde hoş kokulara derin bir saygı, kötü kokulara karşı tiksinti ifade edilmiştir. Tapınma ve meditasyon mekânlarında genellikle parfüm ve baharat kokuları kullanılırdı.

---

* *Romeo ve Juliet*'ten alıntı (*ç.n.*)

Eski Ahit'te Tanrı, Musa'ya bir tapınak inşa etmesini söylerken şöyle der: "Güzel kokulu baharat; kara günnük, onika, kasnı ve saf günnük al. Hepsi aynı ölçüde olsun. Bir ıtriyatçı ustalığıyla bunlardan güzel kokulu bir buhur yap. Tuzlanmış, saf ve kutsal olacak."[1] Eski Mısırlıların bir parfüm tanrısı vardı. Aynı zamanda şifa tanrısı olan Nefertum bir nevi mitsel aromaterapistti.

Sağlığın hoş kokularla ve tersine hastalık ve kokuşmanın pis kokularla ilişkisinden ötürü kokuların sağlık ya da hastalıkla nedensel bir bağlantısı olduğuna inanılmış, bunun tersine kokunun bir sonuç olabileceği düşünülmemiştir. Örneğin, Romalı ünlü hekim Galen, pis kokan çarşaf, yatak ve battaniyelerin vücut sıvılarının kirlenmesini hızlandırabileceğini öğretiyordu. Kanalizasyondan, cesetlerin ve ölü kemiklerinin konduğu mahzenlerden, lağım çukurlarından ve bataklıklardan gelen mide bulandırıcı sızıntıların (miasmalar) pek çok ölümcül hastalığın kaynağı olduğu düşünülüyordu. Aksine, güzel kokuların hastalıkları uzak tuttuğuna inanılırdı; öyle ki Ortaçağ Avrupa'sında hekimler, vebalı bir hastanın evine girmeden önce evin iyice havalandırılması, mürrüsafi, gül, karanfil ve diğer aromatik bitkilerden oluşan tütsüler yakılmasında ısrar ederlerdi. Zaten parfümerinin başlangıcı parfümlerin kişisel bakım ürünü olarak değil de, evlerin dezenfeksiyonu için geliştirilmesine dayanır.

Elbette ki koku duyusunun önemi burun deliklerimizden soluduğumuz koku maddelerini algılamamızla sınırlı değildir. *Tat* duyumuzun da çarpıcı şekilde yüzde 90'a yakın oranda kokuyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Yemeğin tadına baktığımızda dil ve damağımızdaki tat reseptörleri, tükürüğün içinde çözünmüş kimyasalları saptar. Fakat beş temel tadın –tatlı, ekşi, tuzlu, acımtırak ve umami (Japonca "hoş, lezzetli tat" anlamında bir sözcük) – kombinasyonlarını tanıyan hepsi hepsi beş çeşit reseptör vardır. Bununla birlikte yiyecek- içeceklerimizden buharlaşan uçucu koku maddeleri genzimizin arkasından burun boşluğuna girerek yüzlerce farklı koku reseptörü kombinasyonunu aktifleştirir. Bunlar, tatla karşılaştırıldığında, binlerce farklı aromayı ayırt edebilmemizi ve

iyi şarabın, aromatik besinlerin, baharatların, aromatik bitkilerin ve kahvenin zengin *çeşnisinin* (çoğunlukla kokulardan oluşur) tadını çıkarmamızı sağlar. Memeli akrabalarımızın çoğunun keyfini sürdüğü vomeronazal duyumuzu her ne kadar yitirmiş olsak da, kokunun insanlar için kur yapma ve cinsellikte oynadığı rolün kanıtı olan koca bir parfüm endüstrisi vardır. Hatta Freud çoğumuzda koku duyusunun süblimasyonu ile cinsel bastırma arasındaki bağlantıyı görmüş, bununla beraber "Avrupa'da bile* genital organların güçlü kokusundan son derece memnun olan halklar vardır," iddiasında bulunmuştur.[2]

O halde insanlar, köpekler, ayılar, yılanlar, güveler, sıçanlar ya da köpekbalıkları nasıl oluyor da bu mesajları "madde gerçekliği" boyutunda saptayabiliyor? Bu denli geniş çeşitlilik gösteren onca koku maddesini birbirinden nasıl ayırt edebiliyoruz?

Kokuların fiziksel gerçekliği

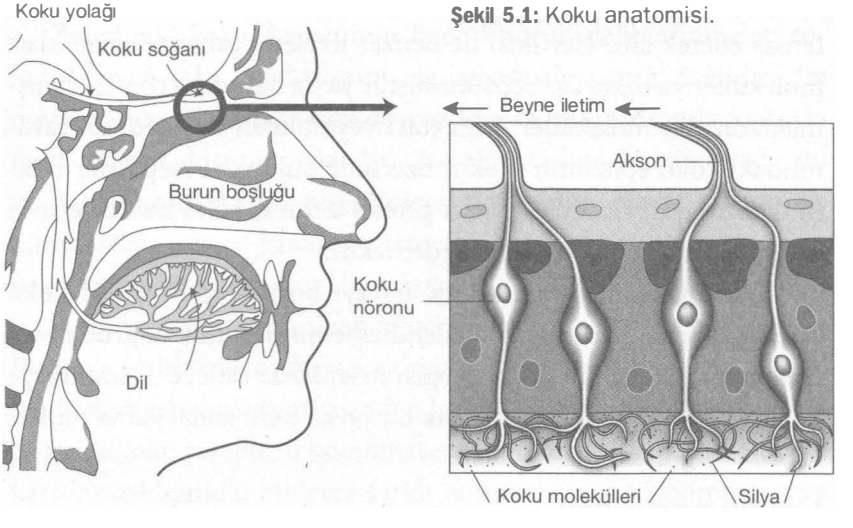
Enformasyonu bir cisimden gelen elektromanyetik dalgalar ya da ses dalgaları aracılığıyla yakalayan görme ve işitme duyularımızdan farklı olarak, gerek tat gerekse koku duyusu enformasyonu "madde gerçekliğinden" mesaj getiren cisimle (bir molekül) doğrudan temas ederek alır. Her ikisi de benzer ilkelerle çalışır. Saptadıkları moleküller ya tükürükte çözünmüştür ya da havada serbestçe uçuşmaktadır; bu moleküller dilin (tat) veya burun boşluğunun tavanındaki koku epitelinin (koku) üzerinde bulunan reseptörler tarafından tutulur. Uçucu olmaları gerekli demek, koku maddelerinin çoğu oldukça küçük moleküllü demektir.

Burnun kendisi koklamada, havayı burnun gerisindeki koku epiteline (şekil 5.1.) doğru yönlendirmenin ötesinde doğrudan rol üstlenmez. Bu küçük doku parçası insanlarda sadece 3 santimetre karelik bir yüzey kaplar (yaklaşık bir posta pulu kadar) ama mukus

* İfadedeki ırkçı imaya dikkat.

salgılayan bezlerin yanı sıra milyonlarca *koku nöronu* içerir. Gözün retina tabakasındaki koniler ve çubuklar görme duyusu için neyse, koku nöronları da koku duyusu için odur. Koku nöronunda hücre zarının *silya* denen tüysü uzantılar oluşturacak şekilde dallandığı ön ucun görünümü süpürge ucunu andırır. Hücre tabakasının dışına doğru uzanan bu fırçamsı silya, kanaldan geçen koku moleküllerini yakalar. Hücrenin arka ucuysa süpürgenin sapına benzer; *akson* denen bu uzantı burun boşluğunun arkasındaki ufak bir delikten çıkıp beyne ulaşarak burada *koku soğanı* denen bölgeye bağlanan siniri oluşturur.

Bu bölümün geri kalanını okurken en iyisi önünüze bir portakal dilimleyip koyun ki meyvenin havada dağılan keskin aroması burnunuzdan geçerek burun epitelinize ulaşsın. Hatta dilimlerden birini ağzınıza atarsanız, uçucu koku molekülleri burnun arkasından da aynı dokuya ulaşacaktır. Bütün doğal kokular gibi portakal kokusu da yüzlerce uçucu bileşikten meydana gelmiş çok karmaşık bir yapıya sahiptir; ancak bu bileşikler arasında en hoş



Şekil 5.1: Koku anatomisi.

kokulu olanlardan biri, molekülden rayihaya giden yolda izini süreceğimiz limonendir.*

Adından da anlaşılacağı üzere limonen, portakal ve limon gibi narenciyede bol bulunan ve bu meyvelerin keskin aromasından ve tadından büyük oranda sorumlu olan maddedir. Bu kimyasal, pek çok bitki ve çiçeğin yapısındaki esansiyel yağların kokulu bileşeni olan; çam, gül, üzüm ve şerbetçiotuna zengin aromasını veren ve *terpenler* adıyla anılan bileşik sınıfındandır. Dolayısıyla dilerseniz portakal yerine bir bardak bira ya da bir kadeh şarap da kullanabilirsiniz. Bu kimyasal narenciyenin yapraklar dahil birçok bölümünde üretilir ama en bol bulunduğu yer, meyvenin sıktığınızda neredeyse saf limonen çıkarabileceğiniz kabuk kısmıdır.

Limonen oda sıcaklığında yavaş yavaş buharlaşan uçucu bir sıvıdır, yani portakalınız etrafındaki havaya milyonlarca limonen molekülü salar. Bunların çoğu oda havasının içinde uçuşur, kapıdan ve pencerelerden dışarı çıkar ama az bir miktarı da hava akımıyla burnunuza taşınır. Bir sonraki nefes alışınızda koku molekülleriyle yüklü hava burun deliklerinizden girip, on milyon civarında koku nöronu taşıyan burun epitelinize ulaşır.

Limonen molekülleri koku epitelinin fırçamsı silyasını yalayarak geçerken bir kısmı koku nöronları tarafından kıstırılır. Tek bir limonen molekülünün yakalanması bile nöronun hücre zarındaki ufacık bir kanalın açılması sonucu pozitif yüklü kalsiyum iyonlarının dışarıdan hücreye akması için yeterlidir. Otuz beş civarında limonen molekülü yakalandığında iyonların hücre içine akışı toplamda bir pikoamperlik** bir elektrik akımı oluşturacak düzeye erişir. Bu düzeyde bir akım, süpürge benzeri hücrenin sap kısmında, yani aksonda, aksiyon potansiyeli denen elektrik sinyalini başlatır (sekizinci bölümde bu konuya çok daha ayrıntılı değineceğiz). Bu sinyal, ta beyninizdeki koku soğanına kadar gider. İleri nöral işleme

* 1-metil-4-(1-metiletenil)-sikloheksen.

** Bir pikoamper bir amperin trilyonda biridir (10^{-12}).

süreçlerinin sonunda "madde gerçekliğinden gelen bu mesajı" portakalın keskin aroması olarak algılarsınız.

Bütün bu süreçteki kilit olay elbette koku molekülünün koku nöronu tarafından yakalanmasıdır. Peki bu nasıl olur? Görme duyusu ve gözün ışığa duyarlı koni ve çubuk hücreleri (bunlar da nöron türleridir) ile kurulan benzerlikten hareketle, koku duyusunun da benzer şekilde yüzeyde bulunan koku reseptörlerince sağlandığı düşünülüyordu. Fakat 1970'lerde koku reseptörlerinin yapısı ve özellikleri konusunda hiçbir şey bilinmiyordu.

New York'un Brooklyn semtinde 1948 yılında dünyaya gelen Richard Axel, Nazi istilasından önce Polonya'dan kaçan göçmen bir ailenin çocuğuydu. Çocukluğu, o bölgedeki her çocuk gibi babasının ayak işlerini yaparak, mahalle sokaklarında, avlularda top oynayarak geçti.

On bir yaşındayken diş hekimlerine protez kuryeliği yaparak çalışma hayatına atıldı; on iki yaşındayken halı döşüyor, on üç yaşındayken mahalledeki şarküteride dana jambon ve pastırma satışı yapıyordu. Lahanaları ince ince kıyarken ezbere Shakespeare okuyan Rus şef, genç Richard'ın şarküteri ve basketbol sahası dışında kültürel dünyayla ilk teması, edebiyata karşı duyacağı derin ve kalıcı ilginin ilham kaynağı olmuştu. Axel'in entelektüel yeteneklerini fark eden lise öğretmeni onu, New York'taki Columbia Üniversitesi'nin edebiyat bölümüne (başarıyla) başvurması için yüreklendirdi.

Axel birinci sınıf öğrencisi olarak kendini 1960'ların fırtınalı üniversite ortamına attı. Ancak partiden partiye koşarken bir yandan da hayatını kazanabilmek için bir moleküler genetik laboratuvarında cam eşyaları yıkamaya başladı. Yeni filizlenmeye başlamış bu bilim dalı onu büyülüyordu ama bir moleküler genetik laboratuvarında cam eşya yıkama işinde durumu ümitsizdi; bunun üzerine işten atılıp araştırma asistanı olarak yeniden işe alındı. Edebiyat ile bilim arasında gidip gelen Axel sonunda bir mezuniyet sonrası genetik kursuna katılmaya karar verdi ama asker olarak Vietnam'a gitmekten kurtulmak için kararını değiştirip tıbba geçti. Tıptaki

durumu da en az cam eşya yıkama işindeki kadar vahimdi. Kalp üfürümünü duyamıyordu, retinayı bir kez olsun görmeyi başaramamıştı; hatta bir keresinde gözlüğü ameliyat sırasında hastanın batın bölgesindeki kesiden içeri düşmüş, bir başka seferinde bir cerrahın parmağını hastaya dikmeyi başarmıştı. Sonunda tek bir şartla mezun olmasına izin verildi: Canlı hastalar üzerinde asla hekimlik yapmayacaktı. Patoloji eğitimi görmek üzere Columbia'ya döndü ama daha ilk yılın ardından bölüm başkanı, ölü hastalar üzerinde de asla çalışmaması gerektiğinde ısrar etti.

Tıbbın sahip olduğu yetenekleri aştığını anlayan Axel sonunda Columbia Üniversitesi'ne araştırma yapmak üzere geri döndü. Sonrasında hızlı bir ilerleme kaydetti; hatta memeli hücrelerine yabancı DNA sokmak için, yirminci yüzyılın sonlarında genetik mühendisliği/biyoteknoloji devriminin başlıca dayanağı olan ve Columbia Üniversitesi'ne lisans anlaşmalarıyla yüz milyonlarca dolar kazandıran yeni bir teknik geliştirdi, burs olarak ona yaptıkları yatırımın cömert bir karşılığı gibi.

1980'li yıllarda Axel moleküler biyolojinin, bu alandaki en büyük gizemi –insan beyninin nasıl çalıştığını– çözmeye yardımcı olup olamayacağını merak ediyordu. Genlerin davranışı üzerinde çalışmaktan davranış genleri üzerinde çalışmaya geçti, uzun vadede amacı "yüksek beyin merkezlerinin, sözgelimi leylak ya da kahve veya kokarca kokusuna dair bir 'algı'yı nasıl geliştirdiğini incelemek . . ." idi.[3] Sinirbilim alanına bir deniz salyangozunun yumurtlama davranışını araştırarak girdi. O sıralarda, çok yetenekli bir araştırmacı olan Linda Buck da Axel'in laboratuvar ekibine katılmıştı. Buck, yeni gelişmekte olan moleküler sinirbilime merak sarıp, araştırmaların ön saflarında yer almak üzere Axel'in laboratuvarına katılmadan önce Dallas Üniversitesi'nde immünoloji eğitimi almıştı. Axel ile Buck, kokunun moleküler temelini incelemek için zekice planlanmış bir dizi deney gerçekleştirdiler. Yöneldikleri ilk konu, koku nöronlarının üzerinde bulunduğu ve farklı koku moleküllerini yakalayıp tanıdığı varsayılan reseptörlerin kimliğini açığa

çıkarmaktı. Diğer duyu hücreleri hakkında bilinenlerden yola çıkarak, reseptörlerin hücre zarından dışarı doğru uzanan ve oradan geçen koku moleküllerine bağlanabilen bir çeşit protein olduğunu tahmin ettiler. Fakat o dönemde koku reseptörleri henüz izole edilmemişti ve bunların neye benzediği ya da nasıl çalıştığı konusunda hiç kimsenin en ufak bir fikri yoktu. Ekibin yola devam etmek için elindeki tek ipucu, bu saptanması zor reseptörlerin, hormonlar gibi başka kimyasal sinyalleri algılayan ve G-proteiniyle eşleşen reseptörler denen protein ailesine ait olabileceğine dair bir sezgiydi.

Linda Buck sadece koku reseptörü nöronlarında eksprese edilen* bu tür reseptörü kodlayan, bütünüyle yeni bir gen ailesi tanımlamayı başardı. Dahası bu genlerin, gerçekten de koku yakalayıcı belirsiz reseptörleri kodladığını gösterdi. Sonraki analizler sıçan genomunun, bu yeni tanımlanmış reseptörden her biri farklı ve muhtemelen her biri tek bir koku molekülünü saptamaya ayarlı olan bin kadarını kodladığını gösterdi. İnsanlarda da benzer sayıda koku reseptörü geni bulunmakla birlikte bunların üçte ikisi dejenere olup *yalancı gen* denen, çok sayıda mutasyonun birikmesi sonucunda işlevini yitirmiş bir nevi gen fosiline dönüşmüştür.

İster üç yüz ister bin reseptör olsun, bu sayılar insanın ayırt edebildiği on bin farklı kokunun yanına bile yaklaşamaz. Koku reseptörleriyle koku tipleri arasında bire bir eşleşme olmadığı açıktı; dolayısıyla koku reseptörlerinin aldığı sinyallerin kokuya nasıl dönüştüğü meselesi gizemini koruyordu. Ayrıca bunca çeşitli koku molekülünü saptama işinin farklı hücreler arasında nasıl paylaşıldığı da açık değildi. Her hücrenin genomu eksiksiz bir koku reseptörü takımı içerdiği için potansiyel olarak her kokuyu tanıyabilir. Yoksa aralarında bir tür işbölümü mü yaparlar? Columbia Üniversitesi ekibi bu sorulara yanıt vermek için daha da zekice bir deney

* Burada "eksprese edilmek" ile kast edilen, bir genin içerdiği bilgiyi RNA'ya kopyalayacak şekilde etkin olmasıdır; bu RNA daha sonra o genin şifrelediği proteinin –sözgelimi bir enzimin ya da belirli bir koku reseptörünün– yapımını sağlayacak protein sentez mekanizmasında kullanılır.

tasarladı. Belirli bir koku reseptörünü eksprese eden bütün koku nöronlarının maviye boyandığı genetik olarak değiştirilmiş fareler kullandılar. Bütün hücrelerin maviye boyanması halinde hepsinin bu reseptörü eksprese ettiği anlamı çıkacaktı. Ekip, genetik mühendisliği ürünü farelerin koku hücrelerini inceleyince yanıt açıklığa kavuştu: Yaklaşık olarak her bin hücrenin biri maviye boyanmıştı. Anlaşılan, her koku nöronu genel olarak bütün kokuları tanımak yerine belli kokuları tanıyan bir uzman gibi çalışıyordu.

Çok geçmeden Linda Buck Harvard'da kendi laboratuvarını kurmak üzere Columbia'dan ayrıldı ve iki grup, koku duyusunun açıklama bekleyen diğer sırlarından pek çoğunu inceledikleri çalışmalarını paralel yürüttü. Kısa sürede koku nöronlarını tek tek izole etmek ve bunların portakalınızdaki limonen gibi belli koku maddelerine karşı duyarlılığını doğrudan inceleyebilmek için birtakım teknikler geliştirdiler. Kokulu kimyasallardan her birinin tek bir nöronu değil, birkaç nöronu etkinleştirdiğini, ayrıca tek bir nöronun birkaç farklı koku molekülüne tepki verdiğini buldular. Bütün bu bulgular, sadece üç yüz koku reseptörüyle on bin farklı kokunun nasıl tanınabileceği muammasını çözmüş görünüyordu. Nasıl ki yirmi dokuz harfi farklı biçimlerde birleştirerek bu kitaptaki sözcüklerin hepsini yazabiliyorsak, aynı şekilde birkaç yüz koku reseptörü de trilyonlarca farklı kombinasyonla etkin hale geçerek geniş bir koku yelpazesi oluşturabilir.

Richard Axel ve Linda Buck "koku maddesi reseptörleri ve koku sisteminin organizasyonu" alanındaki öncü keşifleri nedeniyle 2004 yılında Nobel Ödülü'ne layık görüldüler.

Koku kilidini açmak

İster portakal olsun, ister mercan resifi, isterse eş, yırtıcı veya av, bir şeyin kokusunu almayı başlatan olayın, tek bir koku molekülünün, süpürge benzeri olfaktor nöronların fırçamsı kenarının yüzeyindeki tek bir koku reseptörüne bağlanması olduğu anlaşılmıştır. Peki

ama her bir reseptör nasıl olur da kendine ait limonen gibi bir koku molekülleri grubunu tanır ve koku epitelinin üzerinden akıp giden diğer olası kokulu kimyasal okyanusundan herhangi bir molekülü yakalayıp bağlamaz?

Kokunun özünde yatan gizem işte budur.

Bu sorunun geleneksel açıklaması anahtar-kilit mekanizması olarak bilinir. Koku moleküllerinin koku reseptörlerine bir anahtarın deliğine uyması misali bire bir uyduğu düşünülür. Örneğin, limonen molekülünün özelleşmiş bir koku reseptörüne tam oturduğu ve bu bağlanmanın, henüz aydınlatılmamış bir süreçle reseptörün kilidini açarak, normalde reseptörün iç yüzeyine, gemi gövdesine bağlı bir torpil gibi tutunan G proteininin salıverilmesini tetiklediği düşünülüyordu. Torpil protein hücre içine ateşlendikten sonra hücre zarına gider ve burada elektrik yüklü moleküllerin hücre içine akışını sağlayan bir kanalı açar. Zardan geçen bu elektrik akımı nöronu ateşler (bu konuya dokuzuncu bölümde daha ayrıntılı yer vereceğiz) ve koku epitelinden ta beyne kadar giden bir sinirsel sinyal gönderir.

Anahtar-kilit mekanizması, reseptör moleküllerin biçimsel açıdan koku moleküllerinin tamamlayıcısı olduğunu ve koku moleküllerinin reseptörlerin içine yerleştiğini ileri sürer. Bu mekanizma küçük çocukların oynadığı, belli bir şekli (diyelim ki daire, kare ya da üçgen) olan bloğun, tahta üzerindeki biçimsel tamamlayıcısı olan bir yuvaya yerleştirildiği basit yapbozlara benzer. Her bir koku molekülünü bu şekilli bloklardan biri olarak düşünebiliriz; mesela, portakaldaki limonen gibi bir koku molekülünü daire, elmadakini kare, muzdakini üçgen olarak düşünelim. Bu durumda her bir koku reseptörünü de, içine koku molekülünün tastamam oturacağı ideal şekle sahip bir *koku molekülü bağlayıcı boşluk* olarak hayal edebiliriz.

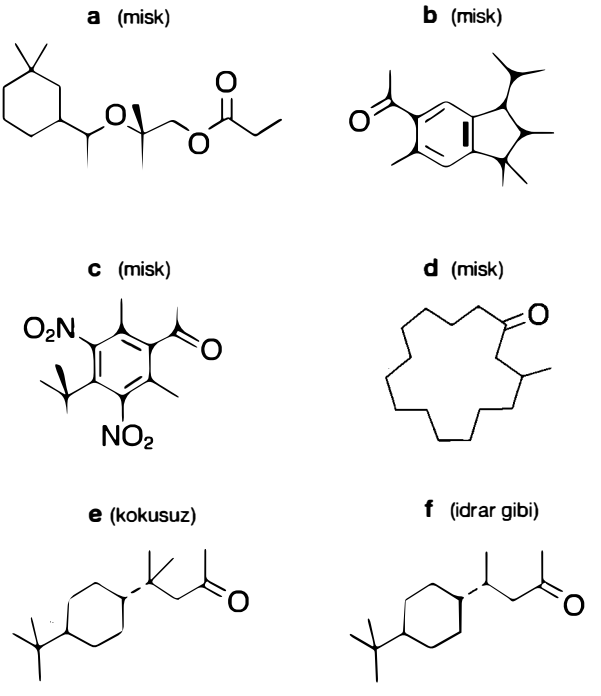
Şüphesiz gerçek moleküller bu denli muntazam değildir; o yüzden gerçek reseptör proteinlerin, gerçek koku moleküllerinin girift biçimlerine uyan çok daha karmaşık bağlanma boşlukları olduğu kabul edilir. Bunların çoğu, üçüncü bölümden anımsayacağınız gibi, enzimlerin substrat moleküllerine bağlandığı aktif bölgeler

gibi muhtemelen son derece karmaşık biçimlerdedir. Gerçekten de koku moleküllerinin bağlanma boşluklarıyla, substratların enzimlerin aktif bölgelerine bağlanmasına (şekil 3.4), hatta ilaçların enzimlerle olan etkileşimine benzer şekilde etkileşimde bulunduğu düşünülüyor. Gerçekten de kuantum mekaniğinin koku molekülleriyle reseptörleri arasındaki etkileşimde oynadığı rolün anlaşılmasının daha etkin ilaç tasarımının yolunu açacağı iddia edilmektedir.

Her halükârda biçim kuramı, bir koku molekülünün şekliyle kokusu arasında bir tür bağıntı olması gerektiğini açıkça öngörür; yani benzer biçime sahip moleküllerin kokularının da benzer olması gerekir, biçimi çok farklı olanların kokularıysa büyük olasılıkla birbirinden gayet net ayrılabilecektir.

İnsanlık tarihinde en büyük korkuyu salmış kokulardan biri, Birinci Dünya Savaşı sırasında siperlerde hissedilen hardal ya da çürük saman kokusuydu. Tarafsız bölgede gözle görünmez gazlar uçuşurdu ve belli belirsiz bir hardal (hardal gazı) ya da küflü saman (fosgen) kokusu askere ölümcül madde ciğerlerine dolmadan önce maskesini takabilmesi için değerli birkaç saniye verirdi. Kimyager Malcolm Dyson'ı bir hardal gazı saldırısından sağ çıktıktan sonra kokunun doğası üzerinde düşünmeye iten şey belki de hassas bir burnun hayatta kalmak açısından ne kadar değerli olduğunu anlamasıydı çünkü savaştan sonra pek çok endüstriyel bileşik sentezliyor ve sentetik tepkimelerin ürünlerini burnuyla kokluyordu. Fakat bir molekülün şekliyle kokusu arasında aşikâr bir ilişki olmaması Dyson'ı şaşırtmıştı. Biçimleri çok farklı olan pek çok molekülün kokusu aynıdır. Örneğin şekil 5.2'de **a-d** ile gösterilen bileşiklerin dördü de misk kokar.* Tersine çok benzer yapıdaki bileşiklerin (örneğin, şekilde **e** ve **f** ile gösterilenler) kokuları genellikle çok farklıdır; bu örnekte **f** idrar gibi koktuğu halde **e** kokusuzdur.[4]

* Misk geleneksel olarak misk geyiğinin cinsel organları ve misk öküzünün yüzündeki bezlerden, ağaç sansarının dışkısından ve uçurum kırsıçanımsısının ("rock badger") idrarından elde edilirdi ama şimdi parfümlerde kullanılan hemen hemen bütün misk sentetik olarak üretiliyor.



Şekil 5.2: (a)-(d) moleküllerinin şekli çok farklı olduğu halde kokuları hemen hemen aynıdır. (e) ve (f) moleküllerininse biçimi aynı ama kokuları çok farklıdır.

Bir molekülün biçimiyle kokusu arasında doğrudan bir ilişki olmaması, parfüm, çeşni ve koku sanayisi için başlı başına bir sorun olagelmiştir. Üreticiler parfümü de bir parfüm şişesini tasarlar gibi tasarlamak yerine, kaba kuvvete dayalı kimyasal senteze ve Dyson gibi kimyagerlerin yaptığı koklama testlerinden oluşan deneme-yanılma yöntemine güvenmek zorundadırlar. Fakat Dyson, koku gruplarının (kokusu aynı olan kimyasallar), şekil 5.2'de misk kokulu kimyasalların hepsinde gördüğünüz çift bağla bağlı oksijen ve karbon atomu (C=O) örneğinde olduğu gibi, sıklıkla aynı kimyasal grupları taşıyan bileşiklerden meydana geldiğini fark etmişti. Bu kimyasal gruplar her büyük molekülün bileşenleri olup, görünüşe göre Dyson'ın dikkatini çeken koku da dahil olmak üzere molekülün pek çok özelliğini belirler. Kokusu benzer olup çeşitli molekül biçimleri gösteren çok sayıda kimyasaldan meydana gelmiş bir başka bileşik grubunda, hidrojen atomunun kükürt atomuna

bağlandığı, kimyasala karakteristik çürük yumurta kokusunu veren *hidrojen sülfür* (S-H) grubu bulunur. Dyson bir adım daha öteye giderek burnun, bütün bir molekülün şeklinden ziyade farklı bir fiziksel özelliğini, atomlar arasındaki moleküler bağların titreşim frekansını saptadığını ileri sürmüştür.

1920'lerin sonlarında Dyson bu iddiaları ilk kez ortaya attığında, hiç kimse moleküler titreşimlerin nasıl saptanacağı konusunda fikir sahibi değildi. Ancak Hintli fizikçi Chandrasekhara Venkata Raman, 1920'lerin başında Avrupa'ya doğru çıktığı deniz yolculuğunda "Akdeniz'in muhteşem mavi ışıltısı"ndan büyülenmiş ve "bu fenomenin kökeninde yatanın, ışığın su molekülleri tarafından saçılması" olduğunu tahmin etmişti. Normalde ışık bir atoma ya da moleküle çarptığında, hiç enerji kaybetmeden, katı bir yüzeye çarpıp seken sert bir lastik top gibi "esnekçe" geri seker. Raman, ışığın nadiren, beyzbol sopasına çarpan sert bir top gibi "esnek olmayan" biçimde saçılabildiğini ve enerjisinin bir kısmını sopaya ve vurucuya aktardığını ileri sürmüştür (hızlı gelen beyzbol topuna sert bir vuruş yaptıktan sonra sopayla birlikte titreşen Bugs Bunny'yi düşünün). Esnek olmayan saçılmada, fotonlar da benzer şekilde enerjilerinin bir kısmını, çarptıkları moleküler bağlara aktararak onların titreşmesine neden olur; bu nedenle saçılan ışık daha az enerjiyle yoluna devam eder. Işığın enerjisinin azalması frekansını düşürür ve rengini tayfın mavi ucuna doğru kaydırarak Raman'ın sözünü ettiği "muhteşem mavi ışıltı"yı verir.

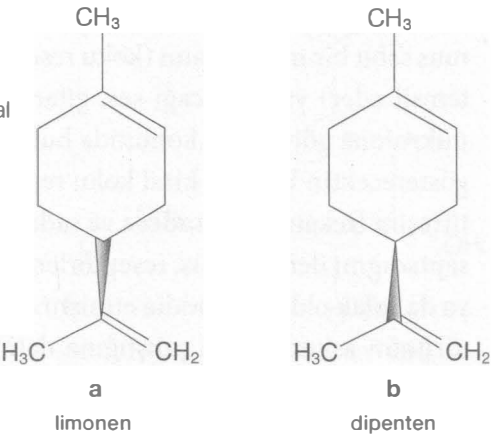
Kimyagerler molekül yapısını araştırırken bu ilkeyi kullanırlar. Esas olarak ışık bir kimyasal numune üzerine düşürülür ve girdi ile çıktı arasındaki renk veya frekans (dolayısıyla enerji) farkı *Raman spektrumu* olarak kaydedilir ki bu o kimyasalın yapısındaki bağların bir tür imzası gibidir. Bu teknik, yöntemi geliştiren fizikçiye atfen Raman spektroskopisi olarak adlandırılmış ve ona Nobel Ödülü kazandırmıştır. Raman'ın çalışmalarını duyan Dyson, aynı mekanizmanın burnun koku moleküllerinin titreşimlerini saptamasında da rol oynayabileceğini düşündü. Burnun, farklı kimyasal bağların

titreştiği imza niteliğindeki frekansları saptayabilecek "bir spektroskop olabileceği" fikrini ileri sürdü. Bununla da kalmayıp, bileşiklerin Raman spektrumunda kokularıyla bağıntı gösteren frekanslarını belirledi. Örneğin, bütün *merkaptanlar* (terminal bir kükürt-hidrojen bağı içeren bileşikler) için 2567-2580 frekansında belli bir ortak Raman tepesi söz konusudur. Ve hepsi de çürük yumurta kokar.

Dyson'ın kuramı en azından kokuların analitik doğasını açıklıyordu ama burnumuzun koku duyusu için Raman spektroskopisi gibi bir şeyi nasıl kullanabileceğine dair hiç kimsenin en ufak bir fikri yoktu. Ne de olsa bunun için, saçılan ışığın biyolojik bir spektroskop tarafından yakalanıp analiz edilmesi gerektiği gibi her şeyden önce bir ışık kaynağına ihtiyaç vardı.

Burnun tastamam aynı kimyasal yapıya ve özdeş Raman spektrumuna sahip ama birbirinin ayna görüntüsü olan moleküller arasında kolayca ayrım yapabildiği anlaşılınca Dyson'ın kuramında daha da ciddi bir eksiklik olduğu ortaya çıktı. Sözgelimi, portakalınızın kokusundan büyük ölçüde sorumlu olan limonen sağ-elli bir molekül olarak tarif edilebilir. Fakat ona neredeyse özdeş olan dipenten molekülü onun sol-elli ayna görüntüsüdür (bkz. şekil 5.3'te her iki çizimde de alt taraftaki ucu sivri taralı alan, sayfanın altını (a) ya da üstünü (b) işaret eden karbon-karbon bağını temsil etmektedir). Dipenten, limonen ile aynı moleküler bağlara sahip olduğu için Raman spektrumu da özdeştir ama kokusu farklıdır, terebentin gibi kokar. Sol-elli ve sağ-elli formları bulunan moleküller *kiral** olarak adlandırılır ve bunların kokuları genellikle farklıdır. Bir başka kiral bileşik de, dereotu ve kimyonda bulunan ve kimyona kokusunu veren karvon adlı kimyasaldır ve onun ayna görüntüsü olan molekül nane gibi kokar. Bir Raman spektroskopisti bu iki bileşiği spektrometre ile birbirinden ayıramaz ama siz şöyle bir koklayarak hemen ayırabilirsiniz. Açıkça görüldüğü gibi koku tek başına moleküler titreşimlerin saptanmasına dayanmaz.

* Kiral molekülün ayna görüntüsü kendisiyle üst üste çakışmaz.



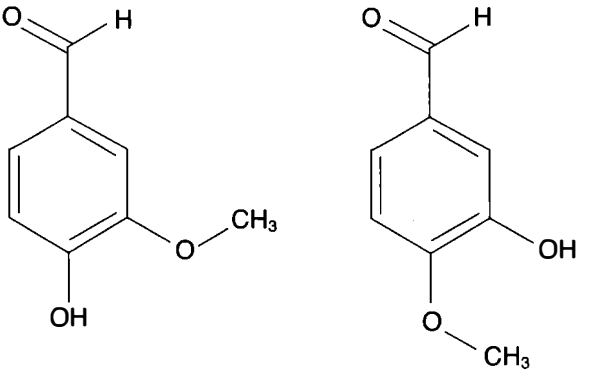
Şekil 5.3: Limonen (a) ile dipenten (b) kokuları çok farklı olan ayna görüntüsü moleküllerdir. Bu iki molekülde sadece alttaki kimyasal grubun yönelimi farklıdır; şekilde bu kimyasal grup limonende sayfanın altına bakan (aşağı bakan bağ), dipentendeyse sayfanın üstüne (yukarı bakan bağ) olarak gösterilmiştir. Dipenten molekülü, kimyasal grubu limoneninki gibi sayfanın altına bakacak şekilde döndürülebilir elbette ama o zaman, taşıdığı çift bağ sağda değil de solda olacağı için molekül yine farklı olacaktır. Bu moleküller bir eldiven çiftinin sağ ve sol teki gibidir.

Koklama duyusuyla ilgili titreşim kuramı, barındırdığı bu vahim görünen yanılgılar yüzünden, bağları aynı olduğu halde kokuları farklı olan sol-elli ve sağ-elli moleküller sorununa olası bir çözüm getiren Kanadalı kimyager Robert H. Wright gibi birkaç moleküler titreşim taraftarının bütün çabalarına rağmen, yirminci yüzyılın ikinci yarısında anahtar-kilit kuramının gölgesinde kaldı. Wright, koku reseptörlerinin kendilerinin de muhtemelen kiral (sol-elli ya da sağ-elli) olduğuna, böylece reseptörün bir koku molekülünü sol-elli ya da sağ-elli tarzda tutarak yapısındaki bağları titreşim detektörüne farklı sunabileceğine işaret etti. Müzikal bir benzetme yapacak olursak, solak olan Jimi Hendrix (koku reseptörünü temsil eder) genellikle gitarını (kiral koku molekülü) gitarın sapı sağa bakacak şekilde tutardı, oysa sağlak olan Eric Clapton (ilk molekülün ayna görüntüsü olan molekülü temsil eder) sap sola bakacak şekilde tutar.* Her iki müzisyen de –aynı titreşimleri yaratan– aynı temayı

* Aslında Hendrix genellikle sağlakların kullandığı gitarı ters çevirip çalardı ama tellerin yerini ince mi solak gitarıyla aynı konumda olacak şekilde değiştirirdi.

çalabilir ama diyelim ki, her ikisi müzisyenin de sol tarafına konmuş sabit bir mikrofonun (koku reseptörünün titreşim detektörünü temsil eder) yakalayacağı ses, gitarların telleri (moleküler bağlar) mikrofona göre farklı konumda bulunacağı için az da olsa farklılık gösterecektir. Wright, kiral koku reseptörlerinin, kimyasal bağların titreşim frekanslarını sadece ve sadece bağlar doğru konumdayken saptadığını ileri sürmüş, reseptörlerin de tıpkı gitaristler gibi sağlak ya da solak olduğunu iddia etmiştir. Ancak biyolojik titreşim detektörünün aslında nasıl çalıştığına dair kimsenin bir fikri olmadığı için titreşim kuramı koku duyusu biliminde marjinal kalmıştır.

Buna karşılık, biçim kuramının da kendine has sorunları vardır. Daha önce de değindiğimiz gibi, bu kuram şekli çok farklı ama kokusu aynı ya da tersine şekli aynı ama kokusu farklı koku moleküllerini açıklamakta zorlanır. Gordon Shepherd ile Kensaku Mori bu sorunları ele alarak 1994 yılında "zayıf biçim" kuramı ya da diğer adıyla odotop kuramını geliştirmiştir.[5] Shepherd ile Mori'nin önerisine göre bu kuramla klasik biçim kuramı arasındaki temel fark, koku reseptörlerinin bütün molekülü şeklen tanımak yerine, sadece kimyasal grup bileşeninin şeklini tanımasıdır. Mesela daha önce de belirttiğimiz gibi, şekil 5.2'deki misk kokulu bütün bileşikler bir karbon atomuna çift bağla bağlı bir oksijen atomu içerir. Odotop kuramı, koku reseptörlerinin molekülün bütününü değil de sadece bu kimyasal yapıların şeklini tanıdığını ileri sürer. Bu kuram, kokunun analitik doğasını daha iyi açıklamakla birlikte, sıra aynı kimyasal gruplarını taşıyan fakat farklı düzenlenmiş moleküllere gelince, titreşim kuramı için geçerli olan sorunların aynısıyla yüz yüze gelir. Dolayısıyla aynı moleküler çatı üzerinde farklı biçimde düzenlenmiş aynı kimyasal gruplara sahip molekül çiftlerinin nasıl olup da farklı kokabildiğini ne odotop kuramı ne de titreşim kuramı açıklayabilir. Örneğin, gerek vanilin (doğal vanilyanın esas bileşeni) gerekse izovanilin, altı karbonlu bir halkaya farklı konumlarda bağlanmış üç özdeş kimyasal grup içerir (şekil 5.4). Odotop kuramı, özdeş kimyasal grupların kokusunun da aynı olacağını öngörür.



Şekil 5.4: Aynı temel kimyasal bölümlere sahip moleküllerin –şekilde görülen vanilin ve izovanilin gibi– kokuları çok farklı olabilir.

Oysa vanilya bildiğiniz vanilya gibi kokarken, izvanilinin kötü fenolik bir kokusu (tatlı ilacımsı) vardır.

Biçim kuramcıları bu sorunların üstesinden gelebilmek için odotop kuramıyla kiral biçim tanıma mekanizmasının bir tür bileşimini önermiştir. Ancak bu görüş, aynı derecede sık karşılaştığımız, birbirinin ayna görüntüsü olan moleküllerin kokusunun nasıl aynı olabildiğini açıklayamaz.* Kuram, bu moleküllerin aynı reseptör tarafından (hem sağ hem de sol eldiven tekinin uyabileceği türde bir elin moleküler eşdeğeri sayılabilecek bir reseptör) tanındığını öne sürer. Ama bu tamamen mantıklı görünmüyor.

Kuantum burnuyla koklamak

Biçim tanımayı anlamak sezgisel olarak daha kolaydır; biçimsel tamamlayıcılıkla günlük hayatta ne zaman eldiven giysek, anahtarı kilide soksak ya da somun anahtarıyla somunu sıkıştırsak karşılaşırız. Enzimler (üçüncü bölümde nasıl çalıştıklarını görmüştük), antikorlar, hormon reseptörleri ve diğer biyomoleküllerin başlıca etkileşim yolunun da atomlar ve moleküllerinin geometrik düzenlenmesiyle

* Örneğin, (4S,4aS,8aR)-(K)-geosmin ile ayna görüntüsü olan molekül (4R,4aR,8aS)-(C)- geosminin her ikisi de "toprak gibi, küflü" kokar.

olduğu bilinmektedir. O nedenle, koku duyusunda biçim kuramının, koku duyusu reseptörleriyle ilgili çalışmalarından ötürü Nobel ödüllü Richard Axel ve Linda Buck da dahil pek çok biyologdan güçlü destek bulması şaşırtıcı değil.

Buna karşılık, en az iki duyumuzun –görme ve işitme– esasını oluşturmasına rağmen, titreşime dayalı iletişim kavramına o denli aşina değiliz. Ancak gözün, ışığın titreşim frekansını algılaması ve kulağın havanın titreşim frekansını kaydetmesiyle ilgili fizik ilkeleri gayet iyi anlaşıldığı halde, kısa süre öncesine kadar, burnun bir moleküler titreşim frekansını nasıl algılayabileceğine dair hiç kimsenin fikri yoktu.

1953 Lübnan doğumlu Luca Turin, University College London'da fizyoloji eğitimi almıştı. Mezun olduktan sonra Fransa'ya yerleşen Turin, Ulusal Bilimsel Araştırmalar Merkezi'nde çalışmaya başladı. Koku duyusuyla ilgili aydınlanmayı ise Nice'te Galeries Lafayette'e yaptığı bir gezi sırasında yaşadı. Parfüm odasının ortasında Japon firması Shiseido'nun tanıtımını yaptığı yeni parfümü Nombre Noir sergileniyordu. Turin bu parfümün kokusunu şöyle betimliyor: "Arka planda sedir ağacından yapılmış puro kutusunun, neredeyse kutsal, sert notalarıyla, gül ile menekşe arası ama her ikisinin de tatlı kokusundan iz taşımayan bir kokuydu. Kurak bir koku değildi, koyu renklerin vitray camı gibi parladığı bir ferahlıkla ışıldıyordu adeta."[6] Turin'in Japon parfümüyle karşılaşması, burna doğru uçuşan moleküllerin nasıl böyle çağrışımlar yarattığının sırrını keşfedebilmek için ömür boyu sürecek arayışına ilham kaynağı olacaktı.

Turin de Dyson gibi, titreşim spektrumu ile koku arasındaki bağıntının rastlantıdan ibaret olmadığına inanıyordu. Dyson'ın, koku reseptörlerinin moleküler titreşimleri her nasılsa algıladığına ilişkin görüşünün doğru olduğunu düşünüyordu. Fakat Dyson'dan farklı olarak Turin, biyomoleküllerin, kimyasal bağ titreşimlerini elektronların kuantum tünellemesi yoluyla belirleyebileceğine dair spekülatif ama akla yakın bir moleküler mekanizma ileri sürüyordu.[7]

Birinci bölümden hatırlayacağınız üzere tünelleme, elektron ya da proton gibi parçacıkların, klasik yollardan geçilmesi imkânsız bariyerlerden sızabilen olasılık dalgaları şeklinde davranmasından kaynaklanan garip bir kuantum mekaniği özelliğidir. Üçüncü bölümde, kuantum tünellemenin pek çok enzimatik tepkimede ne kadar önemli bir rol üstlendiğini görmüştük. Turin kokunun sırrı üzerine kafa patlatırken *esnek olmayan elektron tünelleme spektroskopisi* (inelastic electron tunnelling spectroscopy: IETS) denen yeni bir analitik kimya tekniğini açıklayan bir makaleye denk geldi. IETS'de iki metal levha, minicik bir boşlukla ayrılacak şekilde birbirine çok yakın yerleştirilir. Eğer iki levha arasına bir voltaj uygulanırsa elektronlar levhaların birinde toplanarak onu negatif yüklü hale getirir (verici) ve pozitif yüklü diğer levhanın (alıcı) çekim gücü etkisinde kalır. Klasik bakış açısıyla elektronlar levhalar arasındaki yalıtkan boşluğu sıçrayarak geçemez; ancak elektronlar kuantum varlıklardır ve aradaki boşluk yeterince küçükse, vericiden alıcıya kuantum tünelleme yoluyla geçebilirler. Elektronların enerji kazanıp kaybetmediği bu sürece esnek kuantum tünelleme denir.

Ancak burada çok önemli bir koşul var: Bir elektron verici bölgeden alıcı bölgeye ancak ve ancak tam da aynı enerji düzeyinde boş bir yer varsa esnek tünelleme yapabilir. Eğer alıcıdaki en yakın boşluk daha düşük enerji düzeyindeyse, elektronun sıçramayı yapabilmek için enerji kaybetmesi gerekir. İşte buna esnek olmayan tünelleme adı verilir. Ancak elektrondan boşalan enerjinin bir yere gitmesi gerekir, aksi takdirde elektron tünelleme yapamaz. Levhalar arasındaki boşluğa bir kimyasal konursa, elektron fazla enerjisini bu kimyasala verebildiği sürece tünelleme yapabilir ve elektron bunu ancak o boşluktaki moleküller, boşalan enerjinin frekansına tamamen uyan frekansta titreşim yapabilecek bağlara sahipse gerçekleştirebilir. Enerji fazlasını bu yolla aktararak esnek olmayan tünelleme yapan elektronlar hafifçe daha düşük bir enerjiyle alıcı levhaya ulaşır; esnek olmayan elektron tünelleme spektroskopisi, verici bölgeden ayrılan ve alıcı bölgeye varan elektronların enerjileri

arasındaki farkı analiz ederek kimyasalın moleküler bağlarının doğasını inceler.

Müzik analojimize geri dönecek olursak, telli bir enstrüman çaldıysanız eğer, tele hiç dokunmaksızın rezonansla ses çıkarmanın mümkün olduğunu bilirsiniz. Bu numara gitarı akort etmek için de kullanılabilir. Çok hafif bir kâğıt parçasını kıvırıp telin üzerine yerleştirdikten sonra komşu telde aynı notayı çalarsanız, hiç dokunmadığınız telin üzerindeki kâğıt parçasını fırlatır. Çünkü tam da doğru akordu yakalamışsanız, çaldığınız tel havayı titreştirir ve hava bu titreşimi hiç dokunmadığınız tele aktararak onun çaldığınız telle rezonansa geçip titreşmesine sebep olur. IETS'de elektron, iki levhanın arasına konan kimyasalın yapısındaki bağ ancak elektronun sıçramayı yapabileceği doğru frekansa ayarlıysa verici bölgeden ayrılabilir. Sonuçta, tünelleme yapan elektron levhalar arasındaki kuantum yolculuğu sırasında, moleküler bir bağı gitar telini çeker gibi *çekerek* enerji kaybeder.

Turin, koku reseptörlerinin de benzer şekilde çalıştığını ama IETS'deki levhalarla boşluğun yerini bu kez tek bir molekülün, koku duyusu reseptörünün aldığını ileri sürüyordu. Turin reseptör molekülün *verici bölgesinde* bulunan bir elektron hayal etmişti. Elektron, IETS'de olduğu gibi aynı moleküldeki bir alıcı bölgeye tünelleme yapabilir, ancak Turin iki bölge arasındaki enerji farklılığının elektronu bunu yapmaktan alıkoyduğunu ileri sürmüştür. Reseptör tastamam doğru titreşim frekansına ayarlı bağa sahip bir koku molekülü yakalarsa, elektron koku molekülünün bağlarından birini çekip doğru miktarda enerjiyi moleküle aktararak tünelleme yoluyla vericiden alıcıya geçebilir. Turin, tünelleme yaparak alıcı bölgeye yerleşen elektronun, bir moleküler torpil olan G proteininin bağlı olduğu yerden serbest kalmasına yol açarak koku nöronunu ateşlediğini ve böylece beyne sinyal göndererek portakalın kokusunu "almamızı" sağladığını öne sürmüştür.

Turin, kuantum titreşim kuramı için ikinci dereceden epeyce kanıt toplamıştı. Örneğin, daha önce de sözünü ettiğimiz gibi

kükürt-hidrojen bileşikleri genellikle kuvvetli bir çürük yumurta kokusu salar ve hepsi de 76 terahertz (saniyede 76 trilyon salınım) civarında titreşim yapan kükürt-hidrojen bağına sahiptir. Turin'in kuramına göre, titreşim frekansı 76 terahertz olan bağa sahip başka herhangi bir bileşiğin de, biçimi ne olursa olsun, çürük yumurta gibi kokması gerektiği öngörülebilir. Ne yazık ki spektrumda aynı titreşim bandında olan başka pek az bileşik vardır. Turin, aynı titreşimi gösteren başka bir molekül bulabilmek için spektroskopi literatürünü taradı. Sonunda, boranlar olarak adlandırılan kimyasallardaki terminal bor-hidrojen bağlarının, 76 terahertzlik S–H titreşimine hayli yakın olan 78 terahertz'de titreştiğini buldu. Peki ama boranlar nasıl kokar? Bu bilgi spektroskopi literatüründe mevcut değildi ve adı geçen kimyasallar alışılagelmişin o kadar dışındaydı ki, koklayabileceği tek bir kimyasala bile ulaşamadı. Fakat bu bileşiklerin kokusunu iğrenç olarak betimleyen bir makale buldu ki bu terim genellikle kükürtlü bileşiklerin kokusunu tanımlamak için kullanılır. Gerçekten de, bor ve hidrojen atomlarından meydana gelen dekaboran (kimyasal formülü $B_{10}H_{14}$) gibi boranlar, kükürt *içermediği* halde tıpkı hidrojen sülfür gibi çürük yumurta koktuğu bilinen tek molekül grubudur.

Bugüne dek koklanmış binlerce kimyasal arasında hidrojen sülfür gibi kötü kokan tek bileşiğin aynı titreşim frekansını paylaşan bir molekül olması, kokuyla ilgili titreşim kuramına güçlü bir destek sağlamıştır. Hatırlarsanız, parfüm üreticilerinin uzun yıllardan beri kokunun moleküler kilidini açmaya çalıştıklarını söylemiştik. Turin, kimyacıların başaramadığını başarmanın yolunu bulmuştu: teoriden yola çıkıp kokuyu tahmin etmek. Bu, şişesinin şekline bakıp parfümün kokusunu tahmin etmenin kimyasal eşdeğeriydi. Ayrıca Turin'in kuramı bir biyomolekülün moleküler titreşimi saptamasını sağlayan, biyolojik açıdan akla yakın bir kuantum mekanizması sunuyordu. Ama "akla yakın olması" yeterli değil. Mekanizma doğru muydu acaba?

Burunların mücadelesi

Titreşim kuramı, dekaboran örneğinde olduğu gibi cesaret verici başarılar kazanmıştı ama hâlâ biçim kuramındakine benzer sorunlardan mustaripti; örneğin, ayna görüntüsü moleküller (limonen ve dipenten gibi) kokuları çok farklı olmasına rağmen özdeş titreşim spektrumu gösterebiliyordu. Turin, kuramının bir başka öngörüsünü sınamaya karar verdi. Hatırlayacaksınız, enzim etkisinde tünelleme kuramını (üçüncü bölüm) sınamak için hidrojenin en yaygın rastlanan biçimi yerine, kinetik izotop etkisinden yararlanmak üzere döteryum gibi daha ağır bir izotopu kullanılmıştı. Turin benzer bir hileyi kokusunu, "alıç ya da ağır bir portakal çiçeği kokusunu andıran kekremsi tatlı bir koku" şeklinde betimlediği *asetofenon* için denedi. Bu kimyasalın karbon-hidrojen bağlarındaki sekiz hidrojen atomu yerine döteryum konmuş olan çok pahalı bir numunesini satın aldı. Daha ağır atomlar, tıpkı daha ağır gitar telleri gibi daha düşük frekanslarda titreşir. Normal bir karbon-hidrojen bağı 85 ila 93 terahertz frekansında titreşirken, hidrojen yerine döteryum konursa karbon-döteryum bağının titreşim frekansı yaklaşık 66 terahertze düşer. O nedenle "döteryumlu" kimyasalın titreşim spektrumu hidrojenli olanınkinden çok farklıdır. Ama kokusu farklı mı? Turin laboratuvarının kapısını kilitleyip iki bileşiği de büyük bir dikkatle kokladı. İki bileşiğin "farklı koktuğu, döteryumlu olanın diğeri kadar tatlı değil de daha solvent benzeri bir kokusu olduğu" konusunda ikna olmuştu.[8] Her iki bileşiği özenle saflaştırdıktan sonra bile hidrojenli ve döteryumlu formların çok farklı koktuğuna emindi. Kuramında haklı olduğunu iddia ediyordu.

Turin'in araştırmaları, onun kuantum titreşimiyle ilgili fikirlerinden faydalanarak yeni kokular üretmek üzere Flexitral adlı yeni bir şirket kurmak için gereken finansal desteği sağlayacak yatırımcıların dikkatini çekmişti. Hatta yazar Chandler Burr, Turin'in, kokunun moleküler mekanizmasıyla ilgili arayışını anlatan bir kitap yazdı;[9] BBC ise çalışmalarıyla ilgili bir belgesel hazırladı.

Ama henüz ikna olmayanlar da vardı, özellikle de biçim kuramının taraftarları. Rockefeller Üniversitesi'nden Leslie Vosshall ve Andreas Keller, normal ve döteryumlu asetofenonla koku testlerini tekrarladılar ama Turin'in son derece hassas olan burnuna güvenmek yerine, bu konuda tecrübesiz yirmi dört deneğin iki bileşiği birbirinden ayırt edip edemediğini araştırdılar. Sonuç ortadaydı: Kokular arasında fark yoktu. 2004'te *Nature Neuroscience*'ta[10] yayımlanan çalışmalarına, kokuda titreşim kuramının "bilimsel çevrelerde güven telkin etmediği"ni söyleyen bir editör yorumu eşlik ediyordu.

Ancak tıbbi bilimler alanında çalışan herhangi bir araştırmacının da söyleyeceği gibi, deneklerin beklentilerinden tutun, deney öncesindeki tecrübelerine kadar her türlü sorun insanlar üzerindeki çalışmaları karıştırabilir. Bu sorunların önüne geçebilmek için, Yunanistan'daki Alexander Fleming Enstitüsü'nden Efthimios Skoulakis önderliğinde çalışan ve MIT'den Luca Turin'in de içinde bulunduğu araştırmacıların yer aldığı bir ekip daha akıllı uslu bir türle çalışmaya karar verdi: laboratuvarda üretilmiş sirke sinekleri. Ekip, bu bölümün başlarında anlatılan, Gabriele Gerlach'ın mercan resifi balıklarıyla yaptığı kanal seçimi deneyinin sirke sineklerine uygun eşdeğerini tasarladı. Deneye, sinek "T labirent" deneyi adını verdiler. Sinekler T şeklinde bir labirentin girişine bırakılıyor, sonra da kavşakta sağa mı yoksa sola mı gitmeyi tercih ettiklerine bakılıyordu. Her iki kola da kokulu hava pompalanıyordu; böylece araştırmacılar, sağa ya da sola giden sineklerin sayısına göre, sineklerin sırayla soldan ve sağdan hava akımlarıyla gelen kokuları ayırt edip edemediğine karar veriyorlardı.

Grup ilk olarak sineklerin asetofenon kokusunu alıp almadığını araştırdı. Kokuyu gerçekten de alabiliyorlardı; labirentin sağ kolunun ucuna azıcık asetofenon sürülmesi neredeyse bütün sinekleri meyvemsi kokuya doğru uçmaları için kandırmaya yetiyordu. Bunun ardından grup, asetofenondaki hidrojeni döteryumla değiştirdi ama bu kez bir değişiklikle: sekiz hidrojen atomunun üçünü,

beşini ya da hepsini döteryumla değiştirip kimyasalın bu üç yeni biçiminin her birini ayrı ayrı, labirentin diğer kolunda her seferinde döteryumsuz bileşik olmak üzere denediler. Sonuçlar fevkaladeydi. Sadece üç döteryum atomu içeren bileşik kullanıldığında, sinekler kavşakta sağa dönme tercihini yitirmiş görünüyor, rastgele sağa ya da sola sapıyorlardı. Ancak araştırmacılar sağ taraftaki kolu beş ya da sekiz döteryumlu kimyasalla doldurduğunda sinekler tereddütsüz sola sapıyor, yani döteryumlu koku maddesinden kaçıyordu. Görünüşe göre, asetofenonun normal ve ağır döteryumlu türlerini ayırabiliyorlardı ve kokladıkları yeni şey hoşlarına gitmemişti. Ekip farklı iki kokulu madde daha denedi ve sineklerin oktanolün de hidrojenli ve döteryumlu formlarını ayırt edebildiğini ama benzaldehitin bu formları arasında ayrım yapamadığını buldu. Araştırmacılar ayrıca, sineklerin döteryum bağlarını saptamak için koku duyularını kullandıklarını kanıtlamak için işlevsel koku duyusu reseptörleri olmayan mutant bir sinek soyunu sınadılar. Beklendiği gibi, bu *anosmik** mutantlar hidrojenli ve döteryumlu koku moleküllerini kesinlikle birbirinden ayıramıyordu.

Hatta araştırmacılar Pavlov'un koşullandırma yöntemini kullanarak, sinekleri, belli kimyasalları cezalandırmayla (ayaklara hafif bir elektrik şoku uygulama) ilişkilendirecek şekilde eğitmeyi dahi başardılar. Ekip böylece titreşim kuramını daha da çarpıcı bir şekilde sınayabildi. Önce sinekleri, karakteristik titreşimini 66 terahertzde gösteren karbon-döteryum bağı içeren bileşiklerden uzak duracak şekilde eğittiler. Bu uzak durma, aynı frekansta bağ titreşimi gösteren çok farklı bileşiklere de genellenebilir mi sorusunun yanıtını arıyorlardı. Gerçekten de öyle oldu. Ekip, karbon-döteryum bağı taşıyan bileşiklerden uzak durmak üzere eğitilen sineklerin, kimyasal açıdan çok farklı olmalarına rağmen karbon-azot bağı aynı frekansta titreşim gösteren nitrillerden de uzak durduğunu buldu.

* Koku alamama anlamına gelen *anosmi* sözcüğünden türetilmiştir. Anosmi insanlarda genellikle burun epitelinin hasara uğramasından kaynaklanmakla birlikte nadir görülen genetik biçimleri de bilinmektedir.

Çalışma, en azından sineklerde, koku duyusunun titreşim bileşenine dair güçlü bir destek sağladı ve 2011'de prestijli bir bilimsel dergi olan *Proceedings of the National Academy of Sciences*'ta yayımlandı.[11]

Ertesi yıl Skoulakis ve Turin, University College London araştırmacılarıyla bir ekip kurarak, şu hassas meseleye, insanların da titreşimler yoluyla koku alıp almadığı sorusuna geri döndü. Ekip, sadece Turin'in ileri derecede hassas koku duyusuna güvenmek yerine koklama testine katılacak on bir koklayıcı denek buldu. Önce Vosshall ile Keller'in sonucunu doğruladılar: denekler asetofenondaki karbon-döteryum bağlarını kokuya göre ayırt edemiyordu. Ancak ekip sadece sekiz karbon-hidrojen bağıyla, kimyasalın döteryumlu formundan gelen sinyalin güçsüz olabileceğini, dolayısıyla ortalama bir burun tarafından ayırt edilemeyeceğini düşündü; bunun üzerine, hepsi de döteryumla değiştirilebilecek ve yirmi sekize varan sayıda hidrojen atomu içeren, daha karmaşık, misk kokulu molekülleri (şekil 5.2'dekilere benzer) araştırmaya karar verdiler. Bu kez, asetofenon çalışmasının tersine, on bir deneğin hepsi de normal misk ile bütün hidrojenleri döteryumla değiştirilmiş miski birbirinden kolayca ayırt edebildi. Belki de insanlar farklı frekanslara ayarlı molekülleri kokularına göre ayırabiliyorlardı gerçekten de.

Fizikçiler bir nefes çekiyor

Kuantum titreşim kuramına yönelik eleştirilerden biri, kuramsal temelinin muğlak olmasıydı. Bu soruna artık University College London'dan, 2007'de tünelleme kuramının arkasındaki kuantum hesaplamalarını yapan ve bunun "reseptörün belirli özelliklere sahip olması koşuluyla, gerek altta yatan fizik gerekse kokunun gözlemlenen özellikleriyle uyumlu" olduğu sonucuna varan bir grup fizikçi el atmış durumda.[12] Ekip elemanlarından Jenny Brookes bir adım daha ileri gidip, aynı titreşimi gösteren ama kokuları farklı olan limonen ve dipenten gibi (şekil 5.3) ayna görüntüsü moleküllerle ilgili kafa kurcalayan soruna yönelik bir çözüm öne sürmüştür.

Aslında manyetik kart modeli olarak da anılan fikri ilk kez ortaya atan kişi Jenny'nin danışmanı ve hocası müteveffa Profesör Marshall Stoneham'dı. Birleşik Krallık'ta kuşağının önde gelen fizikçilerinden olan Stoneham'ın nükleer güvenlikten kuantum hesaplamasına, biyolojiye ve bu bölüme gayet uygun bir başka konuya, müziğe varan geniş bir ilgi alanı vardı; Fransız kornosu çalıyordu. Onların kuramı, Robert H. Wright'ın öne sürdüğü, hem koku reseptörünün şeklinin hem de koku molekülündeki bağ titreşimlerinin koku almada rol oynadığı görüşünün kuantum mekaniğine göre detaylandırılmış haliydi. Koku reseptörünün bağlanma boşluğunun, manyetik kart okuyucusu gibi çalıştığını ileri sürdüler. Manyetik kartlarda, cihaz tarafından okunurken elektrik akımı oluşturan bir manyetik bant vardır. Ama her kart manyetik kart okuyucusuna uymaz; makinenin kartı tanıması, dolayısıyla da kartı *kullanabilmeniz* için öncelikle kartın şekli ve kalınlığı ile manyetik bandın yeri doğru olmalıdır. Brookes ile meslektaşları, koku reseptörlerinin de benzer şekilde çalıştığını ileri sürdüler. Ekibin varsayımına göre bir koku molekülü öncelikle sol ya da sağ-elli kiral bağlanma boşluğuna, pos makinesine uyan kredi kartı gibi uymalıdır. Dolayısıyla aynı bağlara ama farklı şekle sahip koku molekülleri, mesela aynı molekülün sol ve sağ-elli biçimleri farklı reseptörler tarafından tutulacaktır. Koku molekülü ancak tamamlayıcısı olan reseptöre bağlandıktan sonra, reseptör nöronun ateşlenmesini sağlayacak olan ve titreşimle indüklenen elektron tünelleme olayını uyarabilme potansiyeline sahip olur. Ancak sol-elli molekül sol-elli reseptörü ateşleyeceği için kokusu, sağ-elli reseptörü ateşleyen sağ-elli molekülünkinden farklı olacaktır.

Gitarın koku molekülü ve gitar tellerinin moleküler bağlar olarak davrandığı müzikal analojimize son kez dönecek olursak, reseptörler de Eric Clapton ya da Jimi Hendrix şeklinde karşımıza çıkar. Her ikisi de aynı moleküler notaları çalabilir ama nasıl ki sağlaklar için yapılmış gitarın sağlak gitaristler tarafından çalınması gerekiyorsa, sağ ya da sol-elli moleküllerin de sağ ya da sol-elli reseptörler

tarafından tutulması gerekir. Yani limonen ve dipenten aynı titreşimi göstermelerine rağmen, sol ya da sağ elli koku reseptörlerince tutulmalıdır. Farklı reseptörler beynin farklı bölgeleriyle bağlantı kurduğu için farklı kokular yaratacaktır. Biçimin ve kuantum titreşimin tanınmasından oluşan bu bileşim, en azından deneysel verilerin hemen hepsiyle uyuşan bir model sunmaktadır bize.

Elbette bu modelin verilere uyuyor olması koku duyusunun kuantum temeline dayandığını tek başına ispatlamaz. Deneysel veriler, kokuyla ilgili biçim ve titreşimi birlikte içeren herhangi bir kurama dair güçlü kanıt sunmaktadır. Bugüne kadar yapılan deneylerin hiçbirinde koku duyusunda kuantum tünellemenin rol oynayıp oynamadığı doğrudan sınanmamıştır. Ancak elektronların esnek olmayan kuantum tünellemesi, proteinlerin koku moleküllerindeki titreşimleri nasıl saptayabileceğine dair makul bir açıklama getirdiği bilinen en azından şimdilik tek mekanizmadır.

Koku duyusu bulmacasının hâlâ eksik olan en önemli parçası, koku reseptörlerinin yapısıdır. Bu eksik parçanın bulunması, bağlayıcı boşlukların her bir koku molekülüne hangi ölçüde uyduğu, ayna görüntüsü moleküllerin aynı reseptörlere mi bağlandığı, reseptör moleküllerin esnek olmayan elektron tünellemeyi destekleyecek şekilde yerleşmiş elektron verici ve alıcı bölgeleri olup olmadığı gibi kilit sorulara yanıt bulmamızı da kolaylaştıracaktır. Ancak dünyanın önde gelen yapısal biyoloji gruplarından bazılarının yıllardır devam eden çabalarına rağmen, enzimlerde (üçüncü bölüm) ya da fotosentetik pigment proteinlerinde (dördüncü bölüm) olduğu gibi kuantum mekaniği mekanizmalarını aydınlığa kavuşturmak için üzerinde çalışılabilecek koku reseptörü moleküllerini izole etmeyi başaran çıkmadı henüz. Sorun, koku reseptörünün doğal halindeyken, deniz yüzeyindeki bir denizanası gibi, hücre zarına gömülü olmasıdır. Reseptör proteini hücre zarından çekip çıkarmak, denizanasını okyanus suyundan çıkarmaya benzer; ikisi de şeklini koruyamaz. Proteinlerin, hücre zarına gömülü vaziyetteyken yapısını belirlemenin yoluysa henüz bulunamamıştır.

Sonuç olarak, hâlâ önemli ölçüde tartışmalı olmakla birlikte, sineklerin ve insanların normal ve döteryumlu bileşiklerin kokularını nasıl ayırabildiği sorusuna bir açıklama getirebilen tek kuram, bir kuantum mekaniği mekanizması olan esnek olmayan elektron tünellemedir. Yakın zamanlı deneyler, sineklerle insanların yanı sıra balıkların dahi hidrojen ve döteryum bağları arasındaki farkı koklayarak anlayabildiğini göstermiştir. Eğer böylesine geniş bir canlı yelpazesi kuantum koku alma özelliğine sahipse, bu mekanizmanın çok yaygın görülüyor olması muhtemeldir. İnsanlar, sirke sinekleri, anemon balıkları ve pek çok başka hayvan, bir elektronun uzayda bir noktada kaybolup bir başka noktada ânında maddeleşebilme becerisinden faydalanarak "madde gerçekliğinden gelen mesajı" yakalayabilir ve onun sayesinde yiyecek, kendine bir eş ya da yuvaya dönüş yolunu bulabilir.

6
Kelebek, sirkesineği ve kuantum kızılgerdan

Kanada'nın Toronto kentinde 1912 yılında dünyaya gelen Fred Urquhart'ın gittiği okul bir sazlığın hemen yanındaydı. Orada saatlerce böcekleri, özellikle de sazlıkta toplanan kelebekleri gözlemlerdi. Yılın en sevdiği zamanı, kral kelebeği denen turuncu-siyah desenli kanatlarıyla simgeleşmiş Kuzey Amerika kelebeğinden binlercesinin bataklığa geldiği yaz başlarıydı. Kral kelebekleri yaz boyu orada kalır, sonbaharda tekrar uçuşa geçene dek bölgedeki ipekotlarıyla beslenirdi. Fred'in kafasını en çok kurcalayan soru şuydu: Kelebekler nereye gidiyordu?

Rivayete göre Aziz Paul'ün söylediği gibi erişkinler genellikle çocukça şeyleri bir kenara bırakırlar. Ama Fred öyle değildi, büyüdüğünde bile kral kelebeklerinin kışı nerede geçirdiğini merak ediyordu. Toronto Üniversitesi'nde zooloji okuyup bu alanda profesör olduktan sonra çocukluk çağında sorduğu soruya döndü. Bu arada, kendisi gibi zoolog ve bir kelebeksever olan Norah Patterson ile evlenmişti.

Fred ile Norah klasik hayvan etiketleme tekniklerini kullanarak, kral kelebeklerinin ortadan kaybolmasının sırrını bulmaya çalışıyorlardı. İşleri hiç kolay değildi. Etiketi kızılgerdanın ayağına bağlamak ya da balinanın yüzgecine tutturmak sorun olmaz ama kelebeğin zarif zarsı kanatlarına gelince iş değişir. Karı-kocadan oluşan ekip yapışkan etiketler kullanmayı ya da etiketi zamkla böceklerin kanadına yapıştırmayı denediyse de ya etiketler düştü ya

da işaretlenen kelebekler uçmakta zorlandı. Bu soruna ancak 1940'a gelindiğinde bir çözüm bulabildiler: yeni alınmış zücaciyenin üzerindeki kazınması zor, kendinden yapışkanlı etiketlere benzer minicik bir etiket. Bu yeni yöntemle yüzlerce kral kelebeğini, üzerinde bir kimlik numarası ve kelebeği bulan kişinin ne yapması gerektiğini açıklayan, "Toronto Üniversitesi Zooloji Bölümüne Gönderin" yazılı etiketlerle işaretleyip salmaya başladılar.

Fakat Amerika'daki milyonlarca kral kelebeğine karşılık kelebeksever iki Urquhart vardı sadece. Bunun üzerine çift gönüllüler toplamaya başladı ve 1950'lere kadar sayısı binlere ulaşan gönüllüler ağı yüz binlerce kelebeği etiketledi, saldı, yakaladı ve kaydetti. Fred ile Norah kelebeklerin yakalanıp salıverildiği noktaları harita üzerinde sürekli güncelledikçe yavaş yavaş bir örüntü ortaya çıkmaya başladı. Toronto bölgesinden kalkan kelebekler daha çok, Teksas'tan geçen ve Birleşik Devletler'i kuzeydoğu-güneybatı doğrultusunda çaprazlamasına kat eden bir rota üzerinde yakalanıyordu. Fakat sayısız araştırma gezisine rağmen Urquhart'lar, kışı geçirmek üzere Birleşik Devletler'in güney eyaletlerine uçan kelebeklerin vardığı nihai noktayı bir türlü saptayamamışlardı.

Sonunda Urquhart'lar gözlerini daha da güneye çevirdiler ve hüsrana uğrayan Norah 1972 yılında Meksika'daki gazetelere projeleri hakkında yazıp, gördükleri kelebekleri bildirecek ve işaretlemeye yardımcı olacak gönüllülere çağrıda bulundu. 1973 Şubat'ında, Mexico City'den Kenneth C. Brugger'dan yardım teklif eden bir mektup aldılar. Ken, akşam geç saatlerde köpeği Kola'yı da yanına katıp karavanıyla Meksika kırsalında kelebekleri aramaya başladı. Bir yıl sonra, Nisan 1974'te orta Meksika'nın Sierra Madre sıradağlarında pek çok kral kelebeği gördüğünü bildirdi. Derken o yılın sonlarına doğru Ken, dağ yollarında çok sayıda parçalanmış, ölü kelebek bulduğunu bildirdi. Norah ve Fred Ken'e yazdıkları yanıtta da söyledikleri gibi, bölgedeki kuş sürülerinin oradan geçen büyük kral kelebeği sürüleriyle beslendiğini düşünüyordu.

9 Ocak 1975 günü Ken heyecanla "koloniyi buldum! . . . milyonlarca kral kelebeği – dağın yanındaki açıklık alanda, her dem yeşil ağaçların üstünde" haberini vermek için Urquhart'lara telefon etti. Ken onlara, yüklü eşekleriyle dağda yol alırken kırmızı kelebek sürüleri gördüğünü iddia eden Meksikalı oduncularda tüyo aldığını söyledi. Norah ve Fred kral kelebeklerinin kimsenin bilmediği kışlık evini bulmak ve kaydetmek için National Geographical Society'nin desteğiyle bir keşif gezisi planladılar ve Ocak 1976'da Meksika'ya vardılar. Ertesi gün köyden çıkıp 3048 metre yüksekliğindeki "Kelebekler Dağı"na tırmanmaya koyuldular. Yaşı ilerlemiş çift için (Fred o sırada 64 yaşındaydı) bu yükseklikte böylesine zorlu bir tırmanış hiç de azımsanacak bir şey değildi ve ikisi de zirveye ulaşıp ulaşamayacakları konusunda hayli endişeliydi. Her şeye rağmen ikisi de kalpleri gümbür gümbür, zihinlerinde Toronto'nun güneşli gökyüzünde canlı renkleriyle süzülen kelebeklerin anıları, seyrek ardıç ve çobanpüskülü ağaçlarının bulunduğu bir plato olan zirveye ulaştı. Ama ortada kelebek falan yoktu. Hüsrana uğrayan yorgun ikili, orta Meksika dağlarındaki yerel bir tür göknarla kaplı açıklığa doğru inişe geçti. Ve işte orada, Fred ile Norah aramakla ömürlerinin yarısını geçirdikleri şeyi nihayet buldular: "Yığınlar halinde kelebekler – her yerde. Yarı uyur halde, sessizlik içinde ağaç dallarını bezemiş, göknarların gövdesini örtmüş, inanılmaz bir kalabalık halinde zemini halı gibi kaplamışlardı." Akıllara durgunluk veren bu görüntü karşısında şaşkınlıkla bakakaldıkları sırada bir ağaç dalı kırıldı ve havalanan kelebeklerden geriye kalan enkazın içinde "Toronto Üniversitesi Zooloji Bölümüne Gönderin" yazısıyla tanıdık gelen beyaz bir etiket Fred'in dikkatini çekti. Etiketi taşıyan kelebek, oraya 3200 kilometreden uzak olan Minnesota'nın Chaska kentinde Jim Gilbert adlı bir gönüllü tarafından işaretlenmişti![1]

Kral kelebeğinin yolculuğu yeryüzündeki en büyük hayvan göçlerinden biri olarak bilinir. Her yıl eylül ile kasım arasında güneydoğu Kanada'daki milyonlarca kral kelebeği, güneybatıya

doğru çıktıkları yolculukta binlerce kilometre mesafe kat ederek çölü, bozkırı, tarlaları ve dağları aşar, Teksas'ta Eagle Pass ile Del Rio arasında coğrafi açıdan büyük bir gedik oluşturan 80 kilometre genişliğindeki serin nehir vadilerini geçip sonunda orta Meksika'da bir düzine kadar yüksek dağın doruğuna iner. Kışı serin Meksika dağlarında geçirdikten sonra ilkbaharda bu kez aynı yolculuğu ters yönde yaparak yazı geçirecekleri topraklara geri dönerler. En çarpıcı olan şeyse, tek bir kelebeğin dahi bu yolculuğu başından sonuna yaşayamamasıdır. Kelebekler yolda üredikleri için Toronto'ya dönen kelebekler, en başta Kanada'yı terk edenlerin torunlarıdır.

Bu böcekler yönlerini nasıl böylesine doğru tayin edip, daha önce sadece atalarının bulunmuş olduğu, başlangıç noktalarından binlerce kilometre uzaktaki küçücük bir hedefe varmayı başarabilmektedir? Doğanın, üzerindeki sır perdesini yeni yeni aralamaya başladığımız büyük gizemlerinden bir başkasıdır bu. Göç eden bütün hayvanlar gibi kral kelebeği de görme ve koklama gibi çeşitli duyularını kullanır; bütün hayvanlarda ve bitkilerde 24 saatlik süreçte, gece-gündüz döngüsünü izleyerek dalgalanmalar gösteren ve *sirkadiyen saat* denen biyokimyasal süreç aracılığıyla, gün boyunca güneşin hareket konumuna göre gerekli düzeltmeyi yapan bir güneş pusulası da bu duyular arasında yer alır.

Sirkadiyen saatlere, gece kendimizi yorgun hissetmemiz, buna karşılık sabah dinç kalkmamızdan ve uzun mesafeli uçuşlarda saatin ritmi bozulduğu için acısını çektiğimiz jet gecikmesinden aşinayızdır. Son yirmi ila otuz yıl sirkadiyen saatlerin nasıl çalıştığı hakkında hayretler uyandıran keşiflere sahne oldu. En şaşırtıcı bulgulardan biri, sürekli aydınlık ortamda tutulan deneklerde kabaca 24 saatlik aktivite ve dinlenme döngüsünün, herhangi bir harici ipucu olmamasına rağmen korunuyor olmasıydı. Anlaşılan, vücut saatimiz, yani sirkadiyen saatimiz genetik olarak belirlenmiştir. Vücudun "tempo ayarlayıcısı" ya da sirkadiyen duyusu olan bu yerleşik saat beynin derinlerine gömülü hipotalamus bezindedir. Ancak sürekli aydınlık ortamda tutulan deneklerde 24 saatlik döngü kabaca

korunmuş olsa da, sirkadiyen saat gerçek zamana göre yavaş yavaş kayar ve uyanık ve uykuda geçen süreler, çalışmaya katılmayan bireylerdekiyle senkronize değildir. Bununla birlikte tekrar doğal ışığa kavuştuğunda deneğin vücut saati kendini, *eşzamanlı hale getirme (entrainment)* olarak bilinen süreçle gerçek aydınlık-karanlık döngüsüne göre yeniden kalibre eder.

Kral kelebeğinin güneş pusulası, güneşin yüksekliğini gün içinde zamana göre kıyaslama yoluyla çalışır ki bu ilişki hem enleme hem de boylama göre değişir. Ayrıca kelebeğin uzun göçü sırasında gündoğumu ve günbatımının zaman değişimlerini telafi etmek için bizimkine benzer şekilde ışık aracılığıyla otomatik olarak eşzamanlı hale gelen bir vücut saati olmalıdır. Peki ama kral kelebeğinin sirkadiyen duyusu neresindedir?

Urquhart'ların da fark ettiği gibi, kelebekler en kolay çalışabileceğiniz hayvanlar değildir; geçen bölümde karşılaştığımız, labirentte yolunu koklayarak bulan sirkesinekleri (*Drosophila*) hızlı ürediği ve kolayca mutasyona uğradığı için laboratuvar araştırmalarına çok daha elverişli böceklerdir. Sirkesinekleri de bizim gibi sirkadiyen ritmini aydınlık ve karanlık döngüsüne göre ayarlar. 1998 yılında genetikçiler, sirkadiyen ritmi ışığa maruz kalmaktan etkilenmeyen bir sirkesineği mutantı buldular.[2] Mutasyonun, kriptokrom denen bir göz proteinini kodlayan gende olduğunu saptadılar. Fotosentez komplekslerinde klorofil moleküllerini bir arada tutan protein iskelet gibi (dördüncü bölümde görmüştük), kriptokrom proteini de, mavi ışığı soğuran bir pigment olan FAD'nin (*flavin adenin dinükleotid*) etrafına sarılmıştır. Tıpkı fotosentezde olduğu gibi ışığın soğurulması pigmentten bir elektron koparır ve oluşan sinyal sineğin beynine ulaşarak vücut saatini günlük aydınlık-karanlık döngüsüyle senkronize hale getirir. 1998'de keşfedilen mutant sinekler bu proteini taşımadığı için vücut saatleri aydınlıkla karanlık arasındaki döngüsel değişikliklere göre ayarlanamıyordu, hayvanlar sirkadiyen duyusunu yitirmişti.

Sonraları insanlar da dahil pek çok başka hayvanın gözünde, hatta bitkilerde ve fotosentez yapan mikroplarda günün fotosenteze en

uygun zamanını belirlemeye yarayan benzer kriptokrom pigmentleri bulundu. Bu pigmentler, hücresel aktiviteleri günlük ritimlerle eşzamanlı hale getirmek için milyarlarca yıl önce mikroorganizmalarda gelişmiş çok eski bir ışık saptama duyusunun devamı olabilir.

Kriptokrom, kral kelebeğinin anteninde de bulunur. Başlangıçta bu durum bir hayli kafa karıştırmıştı: Göz pigmentinin antende işi neydi? Ancak böcek antenleri, koklama ve işitme, hava basıncını, hatta yerçekimini algılama dahil pek çok duyuya ev sahipliği yapan, gerçekten de inanılmaz organlardır. Böceğin sirkadiyen duyusu da antenlerinde olabilir mi? Bu hipotezi sınamak için bilim insanları kelebeklerin antenlerini siyaha boyayarak ışık sinyallerini almasını engellemiştir. Antenleri siyaha boyanan kelebekler güneş pusulalarını gece-gündüz döngüsüyle senkronize edememiştir. Dolayısıyla biyolojik saat görünüşe göre kelebeğin antenlerindedir. Bir diğer çarpıcı nokta, kelebeğin antenlerindeki saatin, böceğin gövdesinden ayrılması durumunda bile ışık tarafından düzenlenebilmesidir.

Kral kelebeğinde biyolojik saatin ışıkla düzenlenebilmesinden sorumlu olan kriptokrom muydu peki? Ne yazık ki kelebek genlerini mutasyona uğratmak sirkesineğindeki kadar kolay değildir; bu yüzden Massachusetts Üniversitesi'nden Steven Reppert ve meslektaşları 2008 yılında yapılabilecek en iyi ikinci şeyi yaptılar. Ekip mutant sirkesineklerindeki kusurlu kriptokrom geni yerine kral kelebeğinin *sağlıklı* genini yerleştirerek, sineğe sirkadiyen ritimlerini ışığa göre senkronize edebilme özelliğini yeniden kazandırdı.[3] Eğer kelebek kriptokromu, sirkesineklerinin biyolojik saatinin doğru zamanı göstermesini sağlayabiliyorsa, kral kelebeğinin böylesine önemli olan vücut saatini ayarlayarak, Toronto'dan Meksika'ya onca yolu kaybolmadan uçmasını da sağlayabilirdi.

Peki ama bütün bunların kuantum mekaniğiyle ne ilgisi var? Bu sorunun yanıtı, hayvan göçünün bir başka yönüyle, "manyetik algılama" dediğimiz, dünyanın manyetik alanını algılama duyusuyla ilgili. Birinci bölümde gördüğümüz gibi, sirkesinekleri ve kelebekler de dahil pek çok canlının bu özelliğe sahip olduğunu bir süreden

beri biliyoruz; hatta özellikle kızılgerdanlardaki manyetik algılama, kuantum biyolojisinin alameti farikası haline gelmiştir. 2008 yılına gelindiğinde kızılgerdanın manyetik duyusunun ışıkla bağlantılı olduğu açıklığa kavuşmuştu (bu konuya sonra döneceğiz) ama ışık reseptörünün yapısı bilinmiyordu. Steven Reppert, sineklere ışık duyarlılığı kazandırarak sirkadiyen ritimlerini senkronize etmelerini sağlayan kriptokromun manyetik algılama duyusunda da rol oynayıp oynamadığını merak etti. Bu kuramı sınamak için, Gabriele Gerlach'ın palyaço balıklarının koku duyusuyla yön bulduğunu göstermek için kullandığı kanal seçimi deneyinin (beşinci bölüm) bir benzerini, hayvanın yiyeceğe ulaşmak için önündeki iki yoldan birini seçmek üzere duyularına yönelik sinyalleri kullanmak zorunda kaldığı bir deney gerçekleştirdi.

Araştırmacılar sineklerin şeker ödülüyle manyetik alan varlığını ilişkilendirecek şekilde eğitilebileceğini buldular. Labirentin manyetik olan ve olmayan iki kolundan birine (yiyecek olmadığı için koku duyusuyla ilgili ipucu da yok) uçma seçeneği tanındığında sinekler manyetik kolu seçti. Sinekler manyetik alanı hissedebiliyor olmalıydılar. O halde bu işte kriptokromun mu parmağı vardı? Araştırmacılar genetik mühendisliği sonucunda kriptokrom taşımayan mutant sirkesineklerinin labirentin her iki koluna da doğru uçma olasılığının eşit olduğunu buldular ki bu, kriptokromun manyetik duyu için şart olduğunu gösteriyordu.

Reppert'in grubu 2010'da yayımlanan makalelerinde, kendi kriptokrom geni yerine kral kelebeği kriptokrom geni aktarılan sineklerin manyetik duyularını koruduğunu da gösterdi;[4] bu bulgu, kral kelebeğinin de dünyanın manyetik alanını algılamak için kriptokromu kullanıyor olabileceğini gösteriyordu. Gerçekten de aynı grubun 2014 yılında yayımlanan bir makalesi, birinci bölümde karşımıza çıkan Avrupa kızılgerdanı gibi kral kelebeğinin de Büyük Göller'den Meksika'daki dağların zirvesine uzanan yolculukta yön bulmak için ışığa bağımlı bir eğim pusulası kullandığını gösteriyordu ve bu pusula tam da beklendiği gibi kelebeğin antenindeydi.[5]

İyi de bir ışık pigmenti nasıl olur da aynı zamanda gözle görünmez bir manyetik alanı algılayabilir? Bu soruyu yanıtlamak için dostumuz Avrupa kızılgerdanına geri dönmemiz gerek.

Kanatlı pusulası

Birinci bölümde belirttiğimiz gibi gezegenimiz, manyetik etki alanı içteki çekirdeğinden uzayda binlerce kilometre öteye uzanan dev bir mıknatıstır. "Manyetosfer" denen bu manyetik kabarcık yeryüzündeki yaşamı korur; zira o olmasaydı, güneş rüzgârı –güneşten yayılan yüksek enerjili parçacık akımı– uzun süre önce atmosferimizi aşındırmış olurdu. Dünyanın manyetik alanı, tipik bir çubuk mıknatıstan farklı olarak zamanla değişir çünkü kaynağını gezegenin içindeki ergimiş demir çekirdekten alır. Bu manyetizmanın kesin kökeni karmaşık olmakla birlikte, geo-dinamo etkisi adıyla bilinen ve dünyanın çekirdeğindeki sıvı metallerin dolaşımının yarattığı elektrik akımlarından kaynaklanan manyetik alana bağlı olduğu düşünülmektedir.

Yani yeryüzündeki yaşam varlığını bu koruyucu manyetik kalkana borçludur. Fakat manyetik alanın canlılara faydası bununla sınırlı kalmaz; bilim insanları, pek çok türün manyetik alandan faydalanmak için dâhiyane yöntemler geliştirmiş olduğunu yüz yılı aşkın süredir biliyorlar. Nasıl ki denizciler binlerce yıldan beri dünyanın manyetik alanını okyanuslarda yön bulmak için kullanıyorlarsa, deniz ve kara memelileri, kuşlar (mesela kızılgerdanımız) ve böcekler dahil yeryüzündeki diğer canlılar da milyonlarca yıl içinde, dünyanın manyetik alanını algılayan ve onu yön bulmak için kullanan bir duyu geliştirmiştir.

Bu becerinin ilk kanıtlarını elde eden kişi, birkaç göçmen kuş türünün vardığı yerleri ve varış tarihlerini kaydeden Rus zoolog Aleksandr von Middendorf'tur (1815-94). Topladığı verilere dayanarak bir harita üzerinde, *isepiptesisler* (eşzamanlı varış çizgileri) denen eğriler belirlemiştir. Kuşların geliş yönünü yansıtan bu

eğrilerden, manyetik kuzey kutbuna doğru "kuzeye yönelen genel bir yakınsama" olduğu çıkarımına varmıştır. Bulgularını 1850'lerde yayımlayarak göçmen kuşların yönünü dünyanın manyetik alanına göre tayin ettiğini ileri sürmüş ve onları "rüzgâr, hava koşulları, gece ya da bulut dinlemeden" yönünü bulan "hava denizcileri" olarak anmıştır.[6]

On dokuzuncu yüzyıl zoologlarının çoğu buna şüpheyle yaklaşmıştır. Paranormal aktivite gibi daha da tuhaf, sözdebilimsel kavramları kabul etmeye hazır bilim insanları bile –ki aralarında on dokuzuncu yüzyıl sonlarında bilim dünyasının önde gelen isimleri de vardır– manyetik alanların yaşamı etkileyebileceğine inanamıyordu. Örneğin, Amerikalı psikolog ve medyum araştırmacısı Joseph Jastrow'un "Manyetik duyunun varlığı" adlı mektubu Temmuz 1886'da *Science* dergisinde yayımlanmıştı. Jastrow, insanların manyetik alandan o ya da bu şekilde etkilenip etkilenmediğini sınamak amacıyla yaptığı deneyleri anlatmış ama herhangi bir duyarlılık saptamadığını bildirmiştir.

Ancak Jastrow'dan sonra yirminci yüzyıla doğru hızla ileri sararsanız, İkinci Dünya Savaşı sırasında Birleşik Devletler Muharebe Birliği için araştırmalar yapan Amerikalı fizikçi Henry Yeagley'nin çalışmalarıyla karşılaşırsınız. Kuşlardaki navigasyon sistemi ordunun ilgisini çekiyordu çünkü o dönemde mesaj taşımak için hâlâ posta güvercinleri kullanılıyordu ve havacılık mühendisleri kuşların navigasyon becerilerinden bir şeyler öğreneceklerini umuyorlardı. Yine de kuşların eve dönüş yolunu nasıl bulabildiği sorusu gizemini koruyordu. Yeagley, posta güvercinlerinin dünyanın hem dönüşünü hem de manyetik alanını algılayabildiğini ileri süren bir kuram geliştirdi. Bunun, kuşun beyninde enlem ve boylam koordinat bilgilerini veren bir "navigasyon koordinat sistemi" oluşturduğunu iddia etti. Hatta kuramını sınamak için on güvercinin kanatlarına küçük mıknatıslar, diğer on güvercinin kanatlarıysa aynı ağırlıkta bakır şeritler iliştirdi. Bakır şerit taşıyan on güvercinden sekizi eve dönüş yolunu bulduğu halde, mıknatıs taşıyanlardan sadece biri yuvasına

geri dönebildi. Yeagley, kuşların yön bulmak için navigasyon duyusunu kullandığı ve bu duyunun manyetik bantlarla bozulabileceği sonucuna vardı.[7]

Yeagley'nin deneysel sonuçları her ne kadar başlangıçta inanılması zor denilerek göz ardı edilmişse de, o zamandan beri birçok araştırmacı, çeşitli hayvanların dünyanın manyetik alanına karşı doğuştan gelen ve onlara şaşmaz bir yön duyusu sağlayan bir duyarlılığa sahip olduğunu şüpheye yer bırakmayacak şekilde ortaya koymuştur. Mesela deniz kaplumbağaları, okyanustaki beslenme alanlarından binlerce kilometre ötede üredikleri sahile hiçbir görsel ipucu olmaksızın dönebilirler; araştırmacılar kafasına güçlü mıknatıslar yerleştirilen deniz kaplumbağalarının yön bulma duyusunun bozulduğunu göstermiştir. 1997 yılında, Yeni Zelanda'daki Auckland Üniversitesi'nden bir ekip, *Nature* dergisinde yayımlanan araştırmalarıyla gökkuşağı alabalığının, burnundaki manyetik reseptör hücreleri kullandığını ileri sürdü.[8] Eğer doğruluğu kanıtlanırsa, gökkuşağı alabalığı dünyanın manyetik alanını *koklayarak* bulabildiği bilinen ilk tür olarak kayıtlara geçecek! Mikroorganizmalar da bulanık sularda yön bulmak için dünyanın manyetik alanından faydalanır; bitkiler gibi yer değiştirmeyen canlılarda dahi bir manyetik algılama duyusu var gibi görünmektedir.

Hayvanların dünyanın manyetik alanını algılayabilme becerisine ilişkin herhangi bir şüphe kalmamıştır. Asıl gizem bunu nasıl yaptıkları, özellikle de dünyanın manyetik alanı bu denli, yani normalde vücuttaki kimyasal tepkimeleri etkilemesi beklenmeyecek kadar zayıfken. Farklı hayvan türlerinde rol oynaması muhtemel belli başlı iki kuram var: Bunlardan ilki, bu duyunun bildiğimiz manyetik pusula gibi işlev gördüğü; diğeriyse manyetik algılamanın bir kimyasal pusula sayesinde çalıştığı.

Manyetik duyuya sahip olduğu düşünülen pek çok hayvan ve mikroorganizmada, doğal yollarla meydana gelen manyetik demir oksit mineralinden oluşan minik manyetit kristallerinin keşfi, hayvanın vücudunda bir yerlerde bildiğimiz pusulaya benzer

bir mekanizmanın bulunduğunu savunan ilk görüşü desteklemiştir. Örneğin, çamurlu deniz çökelinde belli bir yere yönelmek için manyetik duyudan faydalanan bakteriler genellikle mermi şeklinde manyetit kristalleriyle yüklüdür.

1970'lerin sonlarına doğru, dünyanın manyetik alanından yararlanarak yönünü bulan çeşitli hayvanların vücudunda manyetit kristalleri saptanmıştı. Görünüşe göre kanatlı navigatörlerin en ünlüsü olan posta güvercininin üst gagasındaki nöronlarda da manyetit[9] vardı ki bu, söz konusu nöronların, manyetit kristalleri tarafından yakalanan manyetik sinyallere yanıt verdiğini ve sinyali hayvanın beynine gönderdiğini düşündürüyordu. Daha yakın zamanlı araştırmalar, manyetitle dolu nöronların bulunduğu üst gagasına küçük mıknatıslar yerleştirilen güvercinlerin oryantasyonunun bozulduğunu ve jeomanyetik alanı takip etme yetisini kaybettiğini gösterdi.[10] Görünüşe göre, manyetik algılama duyusunun kaynağı nihayet belirlenmişti.

Gelgelelim, 2012 yılında *Nature*'da, güvercin gagasının MR görüntüleme cihazıyla detaylı bir biçimde üç boyutlu olarak incelendiği bir araştırmayla ilgili bir başka makale yayımlandı; bu makalede, güvercin gagasındaki manyetit içeren hücrelerin manyetik algılamayla neredeyse kesinlikle hiç ilgisinin olmadığı ve aslında, bilindiği kadarıyla duyusal algılama ile değil de patojenlere karşı bağışıklıkla ilgili, makrofaj denen demir yüklü hücrelerden ibaret olduğu sonucuna varılınca başa dönüldü.[11]

Bu noktada biraz geri sarıp, 1. bölümde tanıştığımız fevkalade Alman ornitolog Wolfgang Wiltschko'ya dönelim. Wiltschko'nun kuşlardaki navigasyona olan ilgisi 1958'de, başında ornitolog Fritz Merkel'in bulunduğu Frankfurt merkezli araştırma grubuna katılmasıyla başlar. Merkel o dönemde hayvanlarda manyetik duyuyu araştıran az sayıdaki bilim insanından biriydi. Öğrencilerinden biri, Hans Fromme, bazı kuşların özelliksiz, kapalı odalarda konum tespiti yapabildiğini göstermişti ki bu, kuşların navigasyon becerisinin görsel ipuçlarına dayanmadığına işaret ediyordu. Fromme iki olası

mekanizma ileri sürmüştü: kuşlar ya yıldızlardan bir çeşit radyo sinyali alıyor ya da dünyanın manyetik alanını hissedebiliyordu. Wolfgang Wiltschko daha çok ikinci olasılıktan şüpheleniyordu.

1963 yılı sonbaharında Wiltschko, hatırlayacağınız üzere normalde Kuzey Avrupa ile Kuzey Afrika arasında göç eden Avrupa kızılgerdanlarıyla deneyler yapmaya başladı. Göçün ortasında yakaladığı kızılgerdanları manyetik yalıtımlı odacıklara koyup bu kuşları, dünyanın jeomanyetik alanını taklit eden ama kuvveti ve yönelimi değiştirilebilen Helmholtz bobini denen bir cihazla zayıf, yapay, statik manyetik alana maruz bıraktı. Sonbahar ya da ilkbahardaki göç sırasında yakalanan kuşların huzursuzlandığını ve odanın, yapay alana göre göç yönüyle çakışan kenarında toplandıklarını gördü. İki yıl süren zahmetli bir çalışmanın ardından 1965 yılında, kuşların, uygulanan alanın yönüne duyarlı olduğunu gösteren bulguları yayımlandı; Wiltschko, kuşların dünyanın manyetik alanını da benzer şekilde algılayabildiğini düşünüyordu.

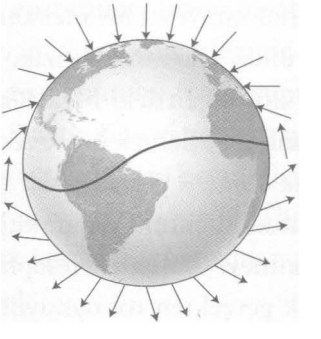
Bu deneyler, kuşlardaki manyetik algılama fikrine bir derece saygınlık kazandırarak daha ileri araştırmaların kıvılcımını çaktı. Fakat o dönemde, bu duyunun nasıl çalıştığına, dünyanın son derece zayıf olan manyetik alanının hayvanların vücudunu nasıl etkileyebildiğine dair hiç kimsenin en ufak bir fikri bile yoktu. Bilim insanları, manyetik algılamayla ilgili duyu organının hayvan vücudunun neresinde olduğu konusunda dahi anlaşamıyorlardı. Birçok hayvan türünde, bildiğimiz manyetik pusula mekanizmasına işaret eden manyetit kristalleri bulunduktan sonra bile, kızılgerdanın navigasyon becerisi gizemini korudu çünkü kuşun vücudunda manyetit bulunamadı. Ayrıca kızılgerdanın duyusu, manyetik pusulaya uymayan bazı şaşırtıcı özellikler gösteriyordu; bilhassa kuşların gözleri bağlandığında navigasyon becerisini yitirmesi, dünyanın manyetik alanını "görmeleri" gerektiğine işaret ediyordu. Peki ama bir hayvan manyetik alanı nasıl *görür*?

1972'de Wiltschko'lar (bu kez Wolfgang eşi Roswitha ile bir ekip olmuştu), kızılgerdanın kullandığı pusulanın, daha önce incelenen

pusulalardan hiçbirine benzemediğini buldular. Normal bir pusulanın, bir ucu (güney ucu) manyetik kuzey kutbunu, diğeri güney kutbunu gösteren manyetik bir ibresi vardır. Ancak manyetik kutuplar arasında ayırım yapmayan bir başka pusula türü daha vardır. Birinci bölümden anımsayacağınız gibi, *eğim (inklinasyon) pusulası* denen bu pusula, hangi kutup daha yakınsa onu gösterir, dolayısıyla size sadece kutba –hangisi olursa olsun– doğru mu gittiğinizi yoksa kutuptan uzaklaşıyor mu olduğunuzu söyler. Bu bilgiyi elde etmenin bir yolu, dünyanın manyetik alan çizgileriyle dünya yüzeyi arasındaki açıyı ölçmektir (şekil 6.1). Eğim açısı (pusula ismini buradan alır) kutup yakınlarında düşeye yakınken (yeri gösterir), ekvatorda yere paraleldir. Ekvatorla kutuplar arasında manyetik alan çizgileri yeryüzüne 90°'nin altında dar açıyla girer ve açı en yakındaki kutbu işaret eder. Dolayısıyla bu açıyı ölçen bir alet bir eğim pusulası olarak işlev görerek yön bilgisi verebilir.

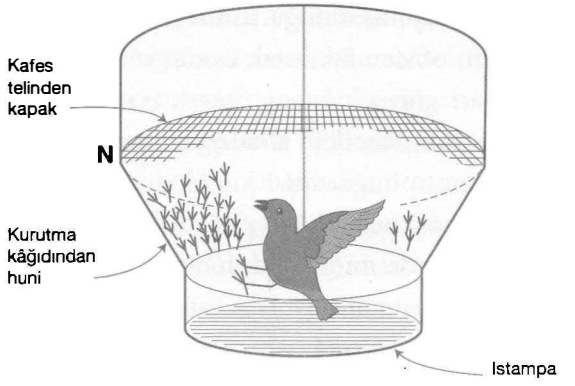
Wiltschko'lar 1972 tarihli deneylerinde kuşları yalıtılmış bir odacığa kapatıp yapay bir manyetik alan uygulamışlardır. Mıknatısı 180° döndürerek alanın polaritesini tersine çevirmelerinin kuşların davranışı üzerinde hiçbir etkisi olmaması kritik bir bulgudur. Kuşlar bu durumda, en yakın manyetik kutba göre yönelim sağlamıştır; bu da bildiğimiz türde bir manyetik pusulaya sahip olmadıklarını göstermektedir. 1972'de yayımlanan makaleleri, kızılgerdanın manyetik alıcısının gerçekten de bir eğim pusulası gibi davrandığını ortaya koymuştur ama pusulanın nasıl çalıştığı açıklığa kavuşmamıştır.

Şekil 6.1. Dünyanın manyetik alan çizgileri ve eğim açısı.



Derken 1974'te, Amerikalı kuş göçü uzmanı Stephen Emlen, Wolfgang ile Roswitha'yı Birleşik Devletler'deki Cornell Üniversitesi'ne davet etti. Stephen Emlen, 1960'lı yıllarda, kendisi gibi saygın bir ornitolog olan babası John ile birlikte, Emlen huni kafesi olarak bilinen özel bir odacık geliştirmişti. Ters koni şeklinde olan bu huninin zemininde bir ıstampa vardır, eğimli kenarlarının iç yüzeyiyse kurutma kâğıdıyla kaplıdır (şekil 6.2). Kuş, kafesin eğimli yan yüzeyinde kanat çırpıp hopladıkça, kaçabilseydi hangi yöne doğru uçmayı tercih edeceğini gösteren ayak izleri bırakır. Wiltschko'ların Cornell Üniversitesi'nde araştırdığı kuş türü, Avrupa kızılgerdanı gibi göç sırasında bir tür iç pusula kullanan, ufak tefek bir Kuzey Amerika ötücü kuşu olan mavi kiraz kuşuydu. Bu kuşun Emlen hunisinde gösterdiği davranışlarla ilgili bir yıl süren çalışmaları 1976'da yayımlandı[12] ve mavi kiraz kuşunun da tıpkı kızılgerdan gibi, jeomanyetik alanı algıladığını şüpheye yer bırakmayacak şekilde ortaya koydu. Wolfgang Wiltschko, Cornell merkezli bu ilk makalelerinin yayımlanmasının, göçmen kuşların doğuştan gelen bir manyetik pusulası olduğunu kuşkuya yer bırakmayacak şekilde gösterdiği ve dünyanın önde gelen ornitologlarının dikkatini çektiği için, ekip açısından bir dönüm noktası olduğunu söylüyor.

Tabii 1970'lerin ortalarında hiç kimsenin, bir biyolojik manyetik pusulanın nasıl çalışıyor olabileceğine dair en ufak bir fikri yoktu. Ancak birinci bölümde de gördüğümüz gibi, Wiltschko'lar ile Stephen Emlen'in ortak çalışmalarının yayımlandığı yıl Alman kimyager Klaus Schulten ışık ile manyetik algılama arasında bağlantı kuran kimyasal bir mekanizma öne sürdü. Schulten bundan kısa süre önce, Harvard'da fizikokimya alanında doktorasını tamamlamış, Göttingen'deki Max Planck Biyofiziksel Kimya Enstitüsü'nde çalışmaya başlamak üzere Avrupa'ya dönmüştü. Orada, ışığa maruz kalma sonucu gelişen hızlı üçlü tepkimesinde ortaya çıkan elektronlarda kuantum dolanıklığın söz konusu olabileceği ihtimaliyle ilgilenmeye başladı. Hesaplamaları, kimyasal tepkimelerde dolanıklık gerçekten rol oynuyorsa, bu tepkimelerin hızının harici bir



Şekil 6.2. Emlen huni kafesi.

manyetik alandan etkilenmesi gerektiğini düşündürüyordu. Schulten bu kuramı ispatlamanın bir yolunu ortaya attı.

Schulten, fikirlerini uluorta anlattıkça Max Planck Enstitüsü'nde adı biraz deliye çıkmıştı. Sorun, onun bir kimyager, dahası üstüne bir laboratuvar önlüğü geçirip görüşünü deneylerle ispatlayabilen bir deneysel kimyager değil de kalem, kâğıt ve bilgisayarla çalışan bir kuramsal fizikçi olmasıydı. O nedenle, parlak bir fikirle çıkış yapan pek çok kuramcı gibi kendine, büyük olasılıkla yanlış olduğu ispatlanacak bir kuramı sınamak için yoğun laboratuvar programından zaman ayırmaya gönüllü, yardımsever bir deneysel araştırmacı bulması gerekiyordu. Schulten, fikrini sınamak için kimyager meslektaşlarının hiçbirini ikna etmeyi beceremedi çünkü hiçbiri onun teklif ettiği deneyde en ufak bir başarı şansı görmüyordu.

Schulten, bütün bu şüpheciliğin enstitünün laboratuvar şefi Hubert Staerk'ten kaynaklandığını anladı. Staerk ile ofisinde yüzleşecek cesareti toplayan Schulten nihayet onun bu inatçı şüpheciliğinin altında yatan nedeni öğrendi: Staerk deneyi zaten yapmış, manyetik alanların bir etkisini görmemişti. Schulten beyninden vurulmuşa döndü. Görünüşe göre hipotezi, evrimsel biyolog Thomas Huxley'nin tarif ettiği, "çirkin bir gerçek tarafından katledilen güzel bir kuram" olmaktan öteye gidemeyecekti.

Staerk'e deneyi yapmış olduğu için teşekkür eden Schulten derin bir kederle tam ofisten ayrılmak üzereyken dönüp hayal kırıklığı yaratan verileri görmek istedi. Staerk ona dosyayı gösterince morali aniden düzeldi. Staerk'in atladığı bir şey dikkatini çekmişti: verilerde tam da onun öngördüğü küçük ama anlamlı bir sapma. Schulten o anı "Tam da beklediğim gibiydi, haliyle görünce çok sevindim. Felaket bir anda mutluluğa dönüştü çünkü neye bakmam gerektiğini biliyordum. O bilmiyordu," sözleriyle anımsıyor.[13]

Schulten hemen oturup çığır açacağından emin olduğu bilimsel makaleyi yazmaya koyuldu ama çok geçmeden bir şok daha yaşayacaktı. Bir konferansta, Münih Teknik Üniversitesi'nden Maria-Elisabeth Michel-Beyerle ile bir şeyler içerken, Michele Beyerle'in de tıpatıp aynı deneyi yapmış olduğunu öğrendi. Bu, Schulten'i etik bir ikileme düşürdü. Keşfini meslektaşına açıklarsa, Michel-Beyerle'i Münih'e dönüp kendi makalesini yazması için harekete geçirebilir, böylece ona kendisini atlatma şansı vermiş olurdu ya da apar topar özür dileyip izin ister ve fırladığı gibi Göttingen'e dönüp kendi sonuçlarını yazabilirdi. Ama tek kelime etmeden kaçıp ilk yayını yaparsa, Michel-Beyerle onu daha sonra kendi fikrini çalmakla suçlayabilirdi. Schulten şöyle düşündüğünü anımsıyor: "Ona şimdi bildiklerimi anlatmazsam, eve gidip deneyi yaptığımı söyleyebilir."[14] Sonunda Schulten doğruyu söylemeye karar verdi ve benzer çalışmayı kendisinin de yapmış olduğunu Michel-Beyerle'e itiraf etti. İkisi de konferansın sonuna kadar kaldılar, sonra her ikisi de kendi evine dönüp, tuhaf kuantum dolanıklık özelliğinin kimyasal tepkimeleri gerçekten de etkileyebildiğini tarif eden kendi makalelerini yazdılar (Schulten'in makalesi Michel-Beyerle'inkinden hemen önce yayımlandı).

Schulten'in 1976 tarihli makalesi[15] Max Planck laboratuvarında araştırılan alışılmamış, hızlı üçlü tepkimelerin hızından kuantum dolanıklığın sorumlu olduğunu ileri sürüyordu; fakat çığır açan makalesinde Staerk'in, kimyasal tepkimenin manyetik alanlara duyarlı olduğunu açıkça gösteren deneysel verilerini de sunmuştu.

"Cepte" iki büyük sonuç, onun yerindeki pek çok bilim insanını memnun ederdi ama henüz otuzuna bile varmamış olan Schulten, gençliğin verdiği pervasızlıkla daha da büyük risk almaya hazırdı. Wiltschko'ların kızlgerdan göçüyle ilgili çalışmalarından ve biyolojik bir pusulaya makul bir kimyasal mekanizma açıklaması bulma probleminden haberdar olan Schulten, spin yapan elektronlarının böyle bir mekanizmayı açıklayabileceğini fark etti; 1978 yılında yayımlanan bir makalede kuşlardaki pusulanın dolanık radikal çifti mekanizmasına bağlı olduğunu ileri sürdü.

O dönemde Schulten'in bu fikrini kimse ciddiye almadı. Max Planck Enstitüsü'ndeki meslektaşları, bu iddianın onun çılgınca fikirlerinden bir başkası olduğunu düşündüler. Schulten'in makalesini gönderdiği ünlü bilimsel dergi *Science*'ın editörleri de pek etkilenmemişlerdi anlaşılan: "Bu denli cüretkâr olmayan bir bilim insanının yapacağı şey bu fikri çöpe atmak olurdu."[16] Schulten bunun üzerine, "Kafamı kaşıyıp 'Bu ya mükemmel bir fikir ya da tamamen aptalca' diye düşündüm. Sonra mükemmel bir fikir olduğuna karar verdim ve yazıyı bir Alman dergisinde gecikmeden yayımlattım!"[17] Fakat bu kritik noktada bilim insanlarının çoğu Schulten'in spekülatif kuramını, manyetik algılamaya dair sözdebilimsel ve paranormal açıklamalarla aynı kefeye koydu.

Schulten ve Wiltschko'ların yaptığı çalışmaların, kuşların yollarını bulmasını nasıl açıklayabileceğini görmeden önce, gizemli kuantum dünyasına geri dönüp, birinci bölümde kısaca değindiğimiz dolanıklık fenomenine dikkatlice bakmamız gerek. Dolanıklık o kadar tuhaf bir şeydir ki, hatırlarsanız Einstein bile ısrarla bunun doğru olamayacağını söylemişti. Ancak sizi öncelikle kuantum dünyasının bir başka acayip özelliği olan "spin" ile tanıştırmamız gerek.

Kuantum spin ve hayaletimsi etki

Kuantum mekaniğiyle ilgili birçok popüler bilim kitabında "kuantum spin" kavramı atomaltı dünyasının garipliğini vurgulamak için

kullanılır. Bu kitapta öyle yapmamayı seçtik çünkü kuantum spin gündelik dili kullanarak kavramsallaştırılması en zor kavram muhtemelen. Ama bu işi daha fazla erteleyemeyeceğimize göre başlayalım bakalım.

Dünya nasıl güneş çevresindeki yörüngesinde dönerken kendi etrafında da dönüyorsa, elektronlar ve diğer atomaltı parçacıkların da normal hareketlerinden farklı, *spin* denen bir özelliği vardır. Ancak birinci bölümde de çıtlattığımız gibi, "kuantum spin", tenis topları ya da gezegenler gibi günlük hayatta karşılaştığımız dönen cisimlere dayalı tecrübemizle gözümüzde canlandırabileceğimiz bir şey değildir. Başlangıç olarak, dönmekte olan bir elektronun hızından bahsetmenin bir anlamı yoktur çünkü elektronun spini iki olası değerden birine sahiptir: tıpkı enerjinin kuantum düzeyinde kuantize olması gibi o da kuantizedir. Elektronlar sadece spin "yukarı" ya da spin "aşağı" denen durumlara karşılık gelen saat yönünde ya da saat yönünün tersine dönebilir. Ve sözünün ettiğimiz kuantum dünyası olduğu için de bir elektron, izlenmediğinde, *aynı anda her iki yöne de dönebilir*. Spin durumunun, spin-yukarı ve spin-aşağı durumlarının süperpozisyonu (yani kombinasyonu ya da karışımı) olduğunu söyleriz. Bir bakıma bu, bir elektronun aynı anda iki konumda birden bulunabileceğini söylemekten bile daha garip gelir kulağa. Bir elektron aynı anda nasıl hem saat yönünde hem de saat yönünün tersine dönebilir ki?

Kuantum spin kavramının sağduyuya ne denli aykırı olduğunu vurgulamak için 360°'lik bir rotasyonun bir elektronu başlangıçtaki konumuna geri getirmeyeceğini söyleyelim; aynı konuma gelebilmesi için elektronun iki tam rotasyon yapması gerekir. Bu insana garip geliyor çünkü elektronu çok küçük bir tenis topu gibi minik bir kürecik olarak düşünme eğilimindeyiz hâlâ. Ama tenis topları makroskobik dünyanın elemanlarıdır, oysa elektronlar farklı kuralların işlediği atomaltı kuantum dünyasında var olur. Gerçekte elektronlar minik kürecikler *değildir*, hatta bir boyutları olduğu

bile söylenemez. Dolayısıyla kuantum spin her ne kadar bir tenis topunun rotasyonu kadar "gerçek"se de, aşina olduğumuz gündelik dünyamızda bir karşılığı yoktur ve resmedilemez.

Ancak bütün bunlardan ötürü kuantum spinin sadece ders kitaplarında ve anlaşılmaz fizik konferanslarında geçen soyut matematiksel bir kavram olduğunu düşünmeyin. Vücudunuzdaki ve evrenin her yerindeki her elektron böyle tuhaf bir dönüş yapar. Aslına bakarsanız, bunu yapmasalardı, ne biz ne de bildiğimiz dünya var olabilirdi çünkü kuantum spin bilimdeki en önemli fikirlerden birinde, kimyanın temelini oluşturan Pauli Dışlama İlkesinde kilit rol oynar.

Pauli Dışlama İlkesinin sonuçlarından biri, eğer iki elektron bir atomda ya da molekülde çift oluşturmuşsa ve aynı enerjiye sahipse (üçüncü bölümden hatırlayacağınız üzere, molekülleri bir arada tutan bağlar, atomlar arasında ortaklaşılan elektronlardan oluşur), o zaman bu iki elektronun spininin birbirine zıt olması gerektiğidir. Bu durumda spinlerin birbirini sıfırlayacağını düşünebiliriz ve tek bir durumda bulunabilecekleri için de *tekli spin durumunda* olduklarını söyleriz Bu, atomlardaki ve moleküllerin çoğundaki elektron çiftlerinin normal durumudur. Ancak elektronlar aynı enerji düzeyinde çiftler oluşturmadığında iki elektronun spini aynı yönde olabilir ve bu duruma, Schulten'in üzerinde çalıştığı tepkimede olduğu gibi *üçlü spin durumu** denir.**

Tek yumurta ikizlerinin, aralarına uzak mesafeler girse bile birbirinin duygusal durumunu hissedebildiğine ilişkin doğruluğu su götürür iddiaları bilirsiniz. Bu görüş ikizlerin, bilimin henüz

* Buradaki "üçlü" terimi, özellikle de bir çift elektronla ilgili olmasından ötürü, kuantum mekaniği konusunda uzman olmayan biri için kafa karıştırıcı olabilir. O nedenle kısaca açıklayalım: Bir elektronun ½ spini vardır denir. O yüzden, bir çift elektronun spinleri zıtsa bu değerler birbirini sıfırlar: ½ – ½ = 0. Buna tekli spin durumu denir. Ancak elektron çiftinin spinleri aynı yönü gösteriyorsa bu değerler toplanır: ½ + ½ = 1. "Üçlü" terimi 1 değerindeki birleşik spinin üç olası yönü (yukarı, aşağı, yana) gösterebileceğini ifade eder.

** Bir oksijen molekülünde, iki atomu normalde bir arada tutan ama çift oluşturmayan iki elektron, üçlü spin durumundadır.

anlayamadığı ruhani bir düzeyde bağlantısı olduğunu savunur. Bir köpeğin, sahibinin eve gelişini nasıl hissediyor göründüğünü açıklamak için de benzer iddialar ortaya atılmıştır. Şunu açıklığa kavuşturalım: Kimileri yanlışlıkla kuantum mekaniği temeline dayandırmaya çalışmış olsa da bu örneklerin hiçbirinin herhangi bir bilimsel değeri yoktur. Bununla birlikte, çoğunlukla ifade edildiği biçimiyle bu tür bir "ânında uzaktan etki" gündelik klasik dünyamızda görülmese de kuantum alanının temel özelliğidir. Teknik dilde *yerel olmama* ("*nonlocality*") ya da *dolanıklık* olarak adlandırılan bu durum, "burada" olan bir şeyin, aradaki mesafe ne olursa olsun *aynı anda* "orada" olan biteni de etkileyebildiğini anlatır.

Bir çift zar düşünün. Zarları attığınızda çift gelme olasılığını matematiksel olarak hesaplamak kolaydır. Zarlardan biri düştüğünde hangi sayı gelirse gelsin, diğer zar da düştüğünde aynı sayının gelme olasılığı altıda birdir. Örneğin, ilk zarı attığınızda dört gelme olasılığı 1/6, iki zarın da dört gelme olasılığı otuz altıda birdir ($1/6 \times 1/6 = 1/36$). Herhangi bir çift atma olasılığı da altıda birdir elbette. 1/6'yı kendisiyle on kez çarparak –hangi sayı olduğuna bakmaksızın– peş peşe on kez çift gelme olasılığının yaklaşık altı milyonda bir olduğunu hesaplayabilirsiniz! Bu da şu anlama gelir: Britanya'da yaşayan her birey peş peşe on kez bir çift zar atsa, istatistiksel olarak sadece biri kişide bütün zarlar her seferinde çift gelecektir.

Ama diyelim ki size birlikte attığınızda hep çift gelen iki zar verildi. Zarlar yere düştüğünde gelen sayı rastgele gibi görünüyor ve her atışta değişiyorsa da, iki zarda her seferinde aynı sayı geliyor. Bu durumda işe hile karıştığından şüphelenirsiniz tabii. Belki de zarların hareketini kontrol eden ve böylece sayıların önceden programlanmış bir diziye göre gelmesini sağlayan sofistike bir iç mekanizması olabilir mi acaba? Bu kuramı sınamak için zarlardan birini elinizde tutup diğerini atarak başlar, sonra ikisini birden atarsınız. Önceden programlanmış bir seri bu duruma ayak uyduramayacağı için hile işe yaramaz. Ama diyelim ki bu stratejiye rağmen zarları attığınızda çift gelmeye devam ediyor.

Bir diğer olası açıklama, zarların uzaktan sinyal alışverişiyle her atış öncesinde bir şekilde yeniden senkronize olmasıdır. Böyle bir mekanizma bir hayli karmaşık olmakla birlikte, en azından prensip olarak tasavvur edilebilir. Gelgelelim, bu tür bir mekanizma, Einstein'ın hiçbir sinyalin ışık hızından daha hızlı yol alamayacağını söyleyen görelilik kuramının getirdiği kısıtlamayla karşılaşır. Bu da size zarlar arasında herhangi bir sinyal geçişi olup olmadığını sınamanız için bir yol sunar: Tek yapmanız gereken, zarların birbirinden, atışlar arasında sinyal senkronizasyonu için yeterli zamanı bırakmayacak kadar uzak olmasını sağlamaktır. Şimdi, yukarıdaki numarayı tekrar denediğinizi düşünelim ama her nasılsa zarlardan birini yeryüzünde, diğerini eşzamanlı olarak Mars'ta atıyorsunuz. Dünya ile Mars'ın birbirine en yakın olduğu noktada dahi ışığın iki gezegen arasındaki yolculuğu dört dakika sürer; dolayısıyla senkronize edici bir sinyalde benzer bir gecikme olması gerektiğini bilirsiniz. İki zarı bu süreden daha kısa aralıklarla, daha sık atarak, atışlar arasında herhangi bir sinyalin zarları senkronize etmesinin önüne geçebilirsiniz. Eğer buna rağmen zarlar çift gelmeye devam ediyorsa, iki zarın arasında, Einstein'ın ünlü sınırlamasını hiçe sayan yakın bir bağlantı var demektir.

Yukarıdaki deney gezegenler arası zarlarla gerçekleştirilmemiş olsa da kuantum dolanık parçacıklarla dünya üzerinde benzer deneyler yapılmıştır ve sonuçlar birbirinden ayrılan parçacıkların, zarlarımız için hayal ettiğimiz numarayı yapabildiğini göstermektedir: Parçacıkların durumu, aralarındaki mesafeden bağımsız olarak bağıntı göstermeye devam eder. Bir yerdeki parçacığın, aralarındaki mesafe ne olursa olsun *aynı anda* bir başka parçacığı da etkileyebildiği kuantum dünyasının bu acayip özelliğinin görünüşe göre Einstein'ın evrensel hız sınırına pek saygısı yoktur. Bu fenomeni tanımlamak için kullanılan "dolanıklık" terimini icat eden, Einstein'ın "uzaktan mesafeden hayaletimsi etki" ifadesiyle yaptığı göndermeden Einstein gibi haz etmeyen Schrödinger'dir. Fakat her ikisinin de şüpheciliğine rağmen pek çok deneyde ispatlanan kuantum dolanıklık, fizik

ve kimya alanında –ve daha sonra göreceğimiz gibi muhtemelen biyolojide de– birçok uygulaması ve örneği olan, kuantum mekaniğindeki en temel fikirlerden biridir.

Kuantum dolanıklığın biyolojiye nasıl dolandığını anlamak için iki düşünceyi bir araya getirmemiz gerek. Bunlardan ilki, uzayda iki parçacık arasında ânında gelişen bu bağlantı, yani dolanıklıktır. İkincisiyse, tek bir kuantum parçacığın iki ya da daha fazla durumda aynı anda süperpozisyon halinde olabilme becerisidir. Örneğin; bir elektron aynı anda iki yönde de dönebilir, dolayısıyla elektronun "spin-yukarı" ve "spin-aşağı" durumların bir süperpozisyonu halinde bulunduğunu söyleyebiliriz. Bir atomda, her biri iki spin durumunun süperpozisyonu halinde bulunan iki dolanık elektronu düşünerek bu iki fikri bir araya getirebiliriz. Her iki elektronun da kesin bir spin yönü olmadığı halde, birinin yaptığı diğer elektronun spinini etkiler ve ondan etkilenir. Ama unutmayın ki aynı atomdaki elektron çiftleri her zaman tekli durumdadır, yani spinleri her zaman zıttır: Biri spin-yukarıyken, diğeri spin-aşağı olmak zorundadır. O halde her iki elektron da aynı anda hem yukarı hem aşağı spinlerin süperpozisyonu halinde bulunmasına rağmen, kuantum garipliği yüzünden, aynı zamanda spinleri hep birbirine zıt olmalıdır.

Şimdi bu iki dolanık elektronu, artık aynı atomda bulunmayacakları şekilde birbirinden ayıralım. Ardından elektronlardan birinin spin durumunu ölçmeye kalkarsak, o elektronu döneceği yönü *seçmeye* zorlarız. Diyelim ki, ölçüm sonucunda elektronun spin-yukarı olduğunu bulduk. Elektronlar dolanık tekli spin durumunda olduğu için bu, diğer elektronun aynı anda spin-aşağı yönde olduğu anlamına gelir. Ama ölçümden önce her ikisinin de spin-yukarı ve spin-aşağı süperpozisyonu durumunda bulunduğunu unutmayın. Ölçümden sonra her ikisinin de bulunduğu durum, biri yukarı diğeri aşağı yönde olmak üzere ayrı ve farklıdır. Yani ikinci elektron ânında ve uzaktan bir etkiyle, fiziksel durumunu aynı anda her iki yöne doğru döndüğü süperpozisyon halinden, spin-aşağı duruma değiştirmiştir, hem de hiçbir temas olmaksızın. Tek yaptığımız,

eşinin durumunu ölçmektir. Ve prensip olarak ikinci elektronun ne kadar uzakta olduğunun önemi yoktur; evrenin öteki ucunda bile olsa etki değişmeyecektir: Dolanık elektron çiftlerinden birinin ölçümü, aralarındaki uzaklık ne olursa olsun, diğerinin süperpozisyon durumunu *derhal* çökertir.

İşte size az da olsa yardımı dokunabilecek bir analoji. Her biri mühürlü bir kutuda ama birbirinden kilometrelerce uzakta olan bir çift eldiven düşünün. Bu kutulardan biri sizde ve kutuyu açmadan önce sizdekinin eldivenin sağ teki mi yoksa sol teki mi olduğunu bilmiyorsunuz. Kutuyu açınca eldivenin sağ tekini bulursanız, açılmamış kutudakinin sol teki olduğunu ânında *bilirsiniz*. Ancak burada önemli olan şu ki, değişen tek şey sizin bilginizdir. Uzaktaki kutuda, sizin kutuyu açıp açmamanızdan bağımsız olarak, eldivenin sol teki vardı zaten.

Kuantum dolanıklık farklıdır. Ölçümden önce iki elektronun da kesin bir spin yönü yoktur. Her iki elektronu da spin-yukarı *ve* spin-aşağı durumların kuantum süperpozisyonundan kesin bir spin-yukarı *veya* spin-aşağı duruma geçmeye mecbur bırakan şey, dolanık iki parçacıktan birinin ölçülmesidir sadece; oysaki eldiven örneğinde bunun karşılığı, sizin uzaktaki eldivenin önceden beri var olan durumunu bilmemenizdi. Elektronlardan birinin kuantum ölçümü onu yukarı ya da aşağı spini "seçmek" mecburiyetinde bırakmakla kalmaz, bu "seçim" diğer elektronu da, ne denli uzakta olursa olsun, ânında tamamlayıcı durumu benimsemeye zorlar.

Eklememiz gereken bir ayrıntı daha var. Daha önce de gördüğümüz gibi, iki elektron çift halinde birbirine zıt yönlerde dönerken birleşik bir tekli durumda, aynı yönde dönerken ise üçlü durumdadır. Aynı atomda tekli durumda bulunan bir çiftten bir elektron komşu atoma sıçrarsa yönü ters dönebilir ve böylece geride bıraktığı ikiziyle aynı yönde dönmeye başlayarak bir üçlü spin durumu yaratır. Ancak bu elektron çifti, artık farklı atomlarda bulundukları halde, kuantum mekaniği açısından birbirleriyle hâlâ bağlı bulundukları o hassas dolanıklık durumunu korur.

Fakat burası kuantum dünyası; atomdan sıçrayan elektronun spin yönünü *değiştirebilmesi* mutlak surette *değiştirdiği* anlamına gelmez. Her iki elektron da hâlâ, aynı anda her iki yöne de dönüşün süperpozisyonu durumunda olacaktır ve böylece elektron çifti, eşzamanlı olarak tekli *ve* üçlü durumun süperpozisyonu halinde var olacak; yani aynı anda hem aynı yönde hem de zıt yönlerde dönecektir!

Yeterli ön eğitimi aldığınıza ve kafanız da muhtemelen karıştığına göre, kuantum biyolojisi alanındaki en tuhaf ama en meşhur fikirle tanışmanızın zamanı geldi artık.

Radikal bir yön duyusu

Bu bölümün başında, dünyanın manyetik alanı kadar zayıf bir etkinin, bir kimyasal tepkimenin sonucunu değiştirerek, sözgelimi bir kızılgerdanın hangi yönde uçması gerektiğini söyleyen biyolojik sinyali meydana getirmeye yetecek enerjiyi nasıl sağlayabildiği sorununu tartışmıştık. Oxfordlu kimyager Peter Hore, bu denli uç noktada bir duyarlılığın nasıl mümkün olabileceğini anlatmak için hoş bir benzetmeden faydalanır:

> Bir kilo ağırlığında bir granit bloğumuz olduğunu farz edelim ve bir sineğin bunu devirip devirememeyeceğini soralım. Sağduyumuz pek tabii ki hayır der. Ama diyelim ki taşı bir kenarı üzerinde dengede tutuyorum. Taşın bu konumda sabit kalamayacağı, kendi haline bırakıldığında sağa ya da sola devrileceği açıktır. Şimdi, diyelim ki blok bu konumda sallanırken sağ tarafına bir sinek konuyor. Sineğin uygulayacağı enerji çok çok küçük olduğu halde, bloğun sola değil de sağa doğru düşmesini sağlamaya yeterlidir.[18]

Bu örnekten çıkaracağımız ders, çok küçük enerjilerin önemli etkiler doğurabileceğidir ama yalnızca çalıştıkları sistem iki farklı

sonuç arasında çok hassas bir dengeye sahipse. Dolayısıyla, dünyanın çok zayıf olan manyetik alanının etkisini saptayabilmek için, çok hassas bir dengede duran granit bloğun, zayıf bir manyetik alan gibi en küçük bir dış etkiden belirgin ölçüde etkilenen kimyasal eşdeğerine ihtiyacımız var.

Şimdi Klaus Schulten'in hızlı üçlü tepkimesine geri dönelim. Atomlar arasındaki elektronik bağların sıklıkla elektron çiftlerinin ortaklaşılmasıyla oluştuğunu hatırlayacaksınız. Bu elektron çiftleri hep dolanıktır ve her zaman tekli spin durumundadır; yani elektronların spinleri birbirine zıttır. Ancak ilginçtir ki iki elektron, atomlar arasındaki bağlar koptuktan sonra bile dolanık kalabilir. Artık *serbest radikaller* olarak adlandıracağımız bu ayrılmış atomlar birbirinden uzağa sürüklenebilir ve elektronlardan birinin spininin tersine dönmesi sonucu –artık farklı atomlarda bulunan– dolanık elektronlar kendini, tıpkı Schulten'in hızlı üçlü tepkimesinde olduğu gibi, hem tekli hem de üçlü durumların bir süperpozisyonu halinde bulabilir.

Bu kuantum süperpozisyonun önemli bir özelliği, eşit dengede olmasının gerekmemesidir: Dolanık elektron çiftini tekli ya da üçlü durumda yakalama olasılığımız eşit değildir. En önemlisi, bu iki olasılık arasındaki denge herhangi bir harici manyetik alana duyarlıdır. Aslına bakılırsa, manyetik alanın, ayrılmış elektron çiftinin oryantasyonuyla yaptığı açı, çifti tekli ya da üçlü durumda yakalama ihtimalimizi etkiler.[19]

Radikal çiftleri fazlasıyla kararsız olma eğilimi gösterdikleri için elektronları, kimyasal tepkimenin ürünlerini oluşturacak şekilde sıklıkla yeniden birleşir. Ancak ürünlerin ince kimyasal özellikleri, sözünü ettiğimiz tekli-üçlü dengesine bağlıdır. Sürecin nasıl işlediğini anlamak için, tepkimenin serbest radikal ara evresini, metaforumuzdaki dengede duran granit bloğa benzetebiliriz. Bu durumda tepkime o denli hassas bir dengeye sahiptir ki –sineğin yerine koyabileceğimiz– zayıf, örneğin dünyanınki gibi 100 mikroteslâdan küçük bir manyetik alan dahi kimyasal tepkimenin ürünlerini

oluşturmak üzere atılan yazı-turada *gelecek* tekli/üçlü durumu etkilemek için yeterlidir.[19] Sonunda manyetik alanların kimyasal tepkimeleri nasıl etkilediğini açıklayabilecek ve Schulten'in iddiasına göre kuşlar için manyetik bir pusula işlevi üstlenebilecek bir mekanizma bulunmuştu.

Fakat öne sürülen bu radikal çifti mekanizmasının kuşun neresinde gerçekleştiğine dair Schulten'in en ufak bir fikri yoktu; en mantıklısı beyinde gerçekleşmesi olabilirdi herhalde. Fakat sürecin işleyebilmesi için öncelikle radikal çiftinin oluşturulması gerekiyordu (tıpkı granit bloğun bir kenarı üzerinde dengede durması gerektiği gibi). Schulten çalışmasını 1978'de Harvard'da sunarken, grubunun Göttingen'de gerçekleştirdiği deneylerde, dolanık radikal elektron çiftleri yaratmak için nasıl lazer atımı kullandığını anlattı. Daha sonra kimya dalında Nobel Ödülü alacak olan saygın bilim insanı Dudley Herschbach da dinleyiciler arasındaydı. Konuşmanın sonundan Herschbach babacan bir edayla takıldı: "İyi de Klaus, bu lazer kuşun neresinde ki?" Schulten böyle kıdemli bir profesöre mantıklı bir yanıt verme baskısı altında, radikal çiftini etkinleştirmek için gerçekten de ışık gerekiyorsa, o zaman bu işlemin kuşun gözünde gerçekleşiyor olabileceğini ileri sürdü.

1977'de, Schulten'in radikal çifti makalesinin yayımlanmasından bir yıl önce, Oxfordlu fizikçi Mike Leask *Nature*'da yayımlanan bir başka makalede, manyetik duyunun kökeninin sahiden de gözdeki fotoreseptörlerde olabileceği tahmininde bulunmuştu.[20] Hatta gözdeki pigment molekülü rodopsinin bunda rol oynayabileceğini öne sürmüştü. Kuşların manyetik algılamasında ışığın rol oynadığına ilişkin elinde hiçbir deneysel kanıt olmamasına rağmen Wolfgang Wiltschko, Leask'in makalesini okuyunca konuya ilgi duydu. Bunun üzerine Leask'in fikrini sınamaya girişti.

O sırada Wiltschko, posta güvercinlerinin dönüş yolunu bulmak için evden uzaklaşırken topladıkları manyetik navigasyon bilgisini mi kullandığını anlamak amacıyla deneyler yapıyordu. Güvercinlerin evden uzağa taşınırken karıştırıcı bir manyetik alana

maruz bırakılmasının, serbest bırakıldıklarında geri dönme becerilerini olumsuz etkilediğini bulmuştu. Leask'in fikrinden ilham alarak, deneyi bir defa da karıştırıcı manyetik alan kullanmadan yapmaya karar verdi. Onun yerine, güvercinleri Volkswagen otobüsünün üzerindeki bir kafeste, tamamen karanlıktayken taşıdı. Bundan sonra kuşlar eve dönüş yolunu bulmakta güçlük çektiler ve bu da güvercinlerin yolculuğun manyetik haritasını çıkarmak ve bunu dönerken kullanmak için ışığa ihtiyacı olduğunu gösterdi.

Wiltschko'lar sonunda 1986 yılında Fransız Alplerindeki bir konferansta Klaus Schulten ile tanıştılar. Kızılgerdanın manyetik algılamasının kuşun gözüne giren ışığa bağlı olduğuna zaten ikna olmuşlardı, ancak manyetik alanların biyokimyasal etkileriyle ilgilenen hemen herkes gibi onlar da radikal çifti hipotezinin doğru olup olmadığından henüz emin değillerdi. Aslında radikal çiftinin gözün neresinde oluşabileceğini kimse bilmiyordu. Derken 1998 yılında sirkesineklerinin gözünde kriptokrom proteini bulundu ve bu proteinin, bölümün başında anlattığımız gibi sirkadiyen ritimlerin ışığa bağlı ayarlanmasından sorumlu olduğu gösterildi. Kriptokromun ışıkla etkileşimi sırasında serbest radikaller oluşturabilen bir protein olduğunun bilinmesi kritik bir noktaydı. Bu bilgiden yararlanan Schulten ve arkadaşları, kriptokromun kanatlıların kimyasal pusulasındaki bulunamayan reseptör olduğunu öne sürdüler. 2000 yılında yayımlanan çalışmaları ileride kuantum biyolojisi alanındaki klasik makalelerden biri olarak anılacaktı.[21] Makalenin yazarları arasında ilk isim, o sırada Klaus Schulten ile doktora konusu üzerinde çalışan ve birinci bölümde de karşılaştığımız Thorsten Ritz'di elbette. Şimdilerde Irvine'deki California Üniversitesi fizik bölümünde çalışan Thorsten, günümüzde manyetik algılama konusunda dünyanın önde gelen uzmanlarından biri kabul edilmektedir.

2000 yılındaki bu makale iki nedenle önemlidir. İlk olarak, makalede kriptokrom kimyasal pusula için aday molekül olarak ileri sürülmüştür ve ikincisi, dünyanın manyetik alanı içinde kuşun

oryantasyonunun gördüklerini nasıl etkileyebileceği, spekülatif de olsa detaylı biçimde güzelce tarif edilmiştir.

Çizdikleri şemanın ilk basamağı, bir mavi ışık fotonunun, bu bölümde daha evvel karşımıza çıkan ve kriptokrom proteinin yapısında bulunan FAD adlı ışığa duyarlı pigment molekülü tarafından soğurulmasıdır. Bu fotonun enerjisi, daha önce de açıkladığımız gibi, FAD molekülündeki bir atomdan bir elektron fırlatmak için kullanılır ve geride bir elektron boşluğu kalır. Bu boşluk, kriptokrom proteininin yapısında bulunan bir amino asit olan triptofanın dolanık elektron çiftinden bir elektron vermesiyle doldurulur. Burada kritik olan, verilen elektronun eşiyle olan dolanıklığının sürmesidir. Bu dolanık elektron çifti, Klaus Schulten'in, manyetik alana karşı ileri derecede duyarlı olduğunu bulduğu kimyasal sistemi, bir tekli/üçlü durum süperpozisyonu oluşturur. Tekli/üçlü durumlar arasındaki hassas denge daha önce de söylediğimiz gibi dünyanın manyetik alanının kuvvetine ve açısına karşı o denli duyarlıdır ki kuşların uçtuğu yön, kimyasal tepkimenin son kimyasal ürünlerinin bileşiminde bir fark yaratır. Bu fark –granit bloğun hangi tarafa devrileceği– hâlâ pek iyi anlaşılamamış bir mekanizmayla, her nasılsa bir sinyal oluşturur ve kuşun beynine gönderilen bu sinyal, hayvana en yakın manyetik kutbun nerede olduğunu söyler.

Ritz ve Schulten'in ileri sürdüğü bu radikal çifti mekanizması pek zarifti olmasına ama gerçek miydi? O dönemde, kriptokromun ışığa maruz kaldığı zaman serbest radikaller oluşturabildiğine dair kanıt bile yoktu. Ancak 2007'de, bu kez Oldenberg Üniversitesi'nden, Henrik Mouritsen öncülüğünde bir başka Alman grup, boz ötleğenin retinasından kriptokrom moleküllerini izole etti ve gerçekten de bu moleküllerin mavi ışığa maruz kalınca uzun ömürlü radikal çiftleri oluşturduğunu gösterdi.[22]

Bu manyetik "görme"nin kuşun zihninde nasıl bir görüntü yarattığı konusunda hiçbir fikrimiz yok; ancak kriptokrom, renkli görmemizi sağlayan opsin ve rodopsin pigmentlerininkine benzer

bir işlev üstlendiğine göre belki de kuşlar için gökyüzünün görüntüsü, tıpkı bazı böceklerin morötesi ışınları görebilmesi gibi, dünyanın manyetik alanının haritasını çizen, bizim göremediğimiz başka bir renkle boyanmıştır.

Thorsten Ritz 2000 yılında kuramını öne sürdüğü zaman kriptokromun manyetik algılamada rolü olduğuna ilişkin kanıt yoktu; oysa şimdi, Steve Reppert ile meslektaşları sayesinde, aynı pigmentin sirkesinekleriyle kral kelebeklerinin dış manyetik alanları saptamasında rol oynadığını biliyoruz. 2004'te araştırmacılar kızılgerdanların gözünde üç tip kriptokrom molekülü buldular; derken 2013 yılında Wiltschko'lar (Wolfgang artık emekliye ayrılmış olsa da her zamanki kadar aktifler), tavuk* gözünden ekstrakte edilen sitokromun, ışığı manyetik algılamada önemli olduğunu keşfettikleri frekanslarda soğurduğunu gösterdiler.[23]

Peki ama bu süreç ille de kuantum mekaniğine mi bağlı olarak işlemek zorunda? Thorsten Ritz, konvansiyonel manyetik pusula ile kimyasal pusulayı serbest radikal mekanizmasına göre ayırt etmeyi denemek üzere 2004 yılında Wiltschko'lar ile çalışmaya gitti. Pusulalar elbette ki manyetik olan herhangi bir şeyden etkilenir: Bir pusulayı mıknatısa yaklaştırırsanız, dünyanın kuzey kutbu yerine mıknatısın kuzey kutbunu gösterir. Standart bir çubuk mıknatıs, zaman içinde değişiklik göstermeyen, yani statik bir manyetik alan oluşturur. Ancak –mesela dönen bir mıknatıs kullanarak– salınım yapan bir manyetik alan da oluşturmak mümkündür ve iş asıl bu noktada ilginçleşmeye başlar. Konvansiyonel bir pusula, salınım yapan bir manyetik alandan da etkilenebilir ama sadece, salınımların pusula iğnesinin izlemesine izin verecek kadar yavaş olması koşuluyla. Eğer salınımlar çok hızlıysa, sözgelimi saniyede yüzlerce kez gerçekleşiyorsa, o zaman pusulanın iğnesi bunları artık izleyemez hale gelir ve etki sıfıra yaklaşır. O halde, konvansiyonel pusula

* Tavuklar –doğada yaşayanlar bile– göç etmezler elbette ama yine de bir manyetik algılama duyusuna sahip gibi görünmektedirler.

düşük frekanslarda salınım yapan manyetik alanlardan etkilenirse de, yüksek frekanslardan etkilenmez.

Fakat kimyasal bir pusulanın yanıtı çok daha farklı olacaktır. Hatırlarsanız, kimyasal pusulanın, tekli ve üçlü durumların süperpozisyonu halinde bulunan radikal çiftlerine dayandığı ileri sürülmüştü. Bu iki durum enerji bakımından farklı ve enerji de frekansla bağlantılı olduğu için sistem, ilgili enerjiler dikkate alındığında, saniyede milyonlarca salınım aralığında olması beklenen bir frekansla ilişki gösterecektir. Neler olup bittiğini anlamanın klasik yolu, (tam anlamıyla doğru olmasa da) dolanık elektron çiftlerinin tekli ve üçlü durum arasında saniyede milyonlarca kez gidip geldiğini hayal etmektir. Bu durumda sistem, salınım yapan bir manyetik alanla rezonans yoluyla etkileşime girer ama bunun için manyetik alanın radikal çiftiyle aynı frekansta salınım yapması, yani müzikal analojimizi tekrar kullanacak olursak *ahenkli* olması gerekir. Rezonans sisteme enerji pompalayarak, yani metaforik granit bloğumuzu daha dünyanın manyetik alanını saptayamadan devirerek, kimyasal pusulanın esasını oluşturan tekli ve üçlü durumlar arasındaki kritik dengeyi değiştirir. Dolayısıyla konvansiyonel bir manyetit pusulasının tersine bir radikal çifti pusulası, çok yüksek frekanslarda salınım yapan manyetik alanlardan olumsuz etkilenir.

Ritz-Wiltschko ekibi, radikal çifti kuramının bu bariz öngörüsünü sınamak için Avrupa kızılgerdanını kullanarak bir deney tasarladı: Kuşun pusulası düşük ya da yüksek frekanslı salınım yapan manyetik alanlara karşı hassas mıydı? Kuşların güneye göçmek için sabırsızlandığı sonbaharın gelmesini beklediler, sonra da onları Emlen huni kafeslerine koydular. Çeşitli yönlerden, çeşitli frekanslarda salınım yapan manyetik alanlar uygulayıp, bu alanların kuşun konumunu tayin edebilmesini sağlayan doğal yeteneğini bozup bozmadığına baktılar.

Sonuçlar hayret vericiydi: 1,3 MHz'e ayarlı (yani saniyede 1,3 milyon döngüyle salınım yapan) bir manyetik alan, dünyanın manyetik alanından binlerce kez zayıf olduğu halde kuşların konum tayin etme

becerisini olumsuz etkiliyordu. Ancak alanın frekansını artırmak ya da azaltmak onu daha az etkili kılıyordu. O halde alan göründüğü kadarıyla, kuş pusulasında, çok yüksek frekanslarda titreşim yapan bir şeyle rezonansa giriyordu ki bunun konvansiyonel manyetit esaslı pusula olmadığı, tekli ve üçlü durumların süperpozisyonundaki dolanık radikal çiftiyle uyumlu bir şey olduğu açıktı. Bu merak uyandırıcı sonuç[24] –gerçekten böyle oluyorsa eğer– dolanık çiftin, kuantum uyumsuzluğu ortamında en azından bir mikrosaniye (saniyenin milyonda biri) süreyle var olabildiğini gösterir aynı zamanda; çünkü aksi takdirde dolanık çiftin ömrü, uygulanan salınımlı manyetik alanın iniş-çıkışlarıyla karşılaşamayacak kadar kısa kalırdı.

Ancak bu sonucun önemi kısa süre önce sorgulanmıştır. Oldenberg Üniversitesi'nden Henrik Mouritsen'in grubu, çok çeşitli elektronik cihazlardan kaynaklanan insan kaynaklı elektromanyetik gürültünün, üniversite yerleşkesinde kuşların yaşadığı ahşap yuvaların korumasız duvarlarından sızarak manyetik pusula oryantasyonunu bozduğunu göstermiştir. Fakat kuşlar, kentsel elektromanyetik gürültüyü yüzde 99'a varan oranda kesen alüminyum zırhlı yuvalara yerleştirildiği zaman oryantasyon becerisi geri gelmiştir. Grubun elde ettiği sonuçların, radyofrekans elektromanyetik alanların bozucu etkisinin dar bir frekans bölgesiyle sınırlı olmayabileceğini düşündürmesi son derece önemlidir.[25]

Dolayısıyla sistemin bazı yönleri gizemini halen korumakta; örneğin, kızılgerdanın pusulasının salınımlı manyetik alanlara neden bu denli duyarlı olduğu, serbest radikallerin biyolojik bir fark yaratacak süre dolanık kalmayı nasıl başardığı gibi. Ancak 2011 yılında Oxford'dan Vlatko Vedral'in laboratuvar ekibi tarafından yayımlanan ve öne sürülen radikal çifti pusulasının kuramsal kuantum hesaplamalarını sunan bir makale, süperpozisyon ile dolanıklığın en az onlarca mikrosaniye boyunca korunması, yani benzer insan yapımı moleküler sistemlerde ulaşılanı epey aşacak ve kızılgerdana hangi yöne uçacağını söylemeye yetebilecek kadar uzun bir süre devam etmesi gerektiğini gösteriyordu.[26]

Bu fevkalade çalışmalar, bugün artık pek çok kuş türü, dikenli ıstakoz, stingray, köpekbalıkları, oluklu balinalar, yunus, arı, hatta mikroorganizmalar dahil çok geniş bir türler yelpazesinde varlığı gösterilmiş olan manyetik algılamaya karşı büyük bir ilgi patlamasına yol açtı. Bu canlıların çoğunda, ilgili mekanizma araştırılmamış olsa da kriptokromla ilişkili manyetik algılamanın, daha önce bahsettiğimiz kahraman kızılgerdanımızdan tutun, tavuklara ve sirkesineklerine varan çeşitli canlı türlerinde ve bitkiler dahil diğer birçok organizmada bulunduğu artık bilinmektedir.[27] Bir Çek grubunun 2009 tarihli çalışması, Amerikan hamamböceğinde manyetik algılamanın bulunduğunu ve tıpkı Avrupa kızılgerdanında olduğu gibi bu algılamanın yüksek frekanslı salınım yapan manyetik alanlar tarafından bozulduğunu göstermiştir.[28] Bunu takiben, 2011 yılında yapılan bir konferansta sunulan bir çalışmaysa hamamböceği pusulasının işlevsel kriptokroma ihtiyaç duyduğunu gösterdi.

Doğada böylesine yaygın bulunan bir beceri ve ortak mekanizmanın keşfi, bu özelliğin ortak bir atadan kalıtım yoluyla aktarılmış olduğunu düşündürmektedir. Ancak tavukların, kızılgerdanların, sirkesineklerinin, bitkilerin ve hamamböceklerinin ortak atası çok çok eskiden, 500 milyon yılı aşkın bir süre önce yaşamıştır. O halde kuantum pusulalarının geçmişi çok çok eskiye dayanıyor olsa gerek; Kretase dönemi bataklıklarında, üçüncü bölümde karşılaştığımız T. rex'in yanında gezinmiş sürüngenlerin, Permian denizlerinde yüzmüş balıkların, Kambriyen okyanuslarında dipte gezmiş ya da kumun altına girip gizlenmiş eklembacaklıların, hatta belki Kambriyen öncesi döneme ait mikroorganizmaların navigasyon becerileri kuantum pusulalarına dayanıyordu. Einstein'ın uzak mesafeden hayaletimsi etki dediği şey, belki de gezegen tarihinin büyük bölümünde dünyanın dört bir tarafındaki canlıların yolunu bulmasına yardımcı olmuştu.

7
Kuantum genler

Dünyanın en soğuk yeri sandığınızın aksine Güney Kutbu değil, kutup noktasından 1300 kilometre ötede, doğu Antarktika buz tabakasının ortasında bir yerdir. Kışın sıcaklık sıfırın onlarca derece altına iner. Yeryüzünde bugüne dek en düşük sıcaklık 21 Temmuz 1983 tarihinde orada ölçülmüş ve −89,2°C ile bölgeye "Soğuk Güney Kutbu" unvanını kazandırmıştır. Bu denli düşük derecelerde çelik bile parçalanır, mazotun testereyle kesilmesi gerekir.

Aşırı soğuk, havadaki bütün nemi dondurur ve buz tutmuş düzlüklerden bitimsiz esen güçlü rüzgârlarla birlikte doğu Antarktika'yı gezegenimizin herhalde en yaşanmaz yeri kılar.

Oysa bu bölge ezelden beri böyle değildi. Antarktika'yı oluşturan kara kütlesi bir zamanlar Gondwana adıyla bilinen süperkıtanın bir parçasıydı ve aslında ekvatora yakındı. Dinozorlarla gergedan benzeri Lystrosaurus gibi otçul sürüngenlerin otladığı tohumlu eğreltiler, ginkgo ağaçları ve sikadlardan oluşan sık bir bitki örtüsüyle kaplıydı. Fakat yaklaşık seksen milyon yıl önce bu büyük kara kütlesi parçalanmaya başladı ve parçalardan biri güneye doğru kayarak sonunda Güney Kutbu'na yerleşip Antarktika'yı oluşturdu. Derken altmış beş milyon yıl önce dev bir asteroit dünyaya çarparak dinozorlarla devasa sürüngenleri yeryüzünden sildi ve geride sıcakkanlı memelilerin hâkim olacağı bir yaşama alanı bıraktı. Asteroitin çarptığı yerin çok uzağında kalmasına rağmen Antarktika'nın faunası ve florası kökten bir değişiklik geçirdi; eğreltilerle sikadların

yerini yaprak döken ormanlar aldı. O zamanlar bu alanlarda, bugün soyu tükenmiş olan keseliler, sürüngenler, dev penguenler ve başka kuşlar yaşıyordu. Vadiler hızlı akan nehirlerle, kemikli balıkların ve eklembacaklıların kaynaştığı derin göllerle doluydu.

Ancak sera gazlarının düzeyi azalınca, Antarktika'daki sıcaklık da düştü. Okyanus akıntıları soğumayı daha da artırdı ve yaklaşık otuz dört milyon yıl önce nehirleriyle iç göllerinin yüzeyindeki su kışın donmaya başladı. Derken yaklaşık on beş milyon yıl önce, kışın oluşan buz yazın eriyemez hale geldi; gölleri ve ırmakları donuk bir çatının altına hapsetti. Gezegenimiz soğumaya devam ederken devasa boyutlarda buzullar Antarktika'nın üzerinde gezinerek oradaki bütün karasal memelileri, sürüngenleri ve amfibyumları ortadan kaldırdı; karayı, gölleri ve nehirleri kilometrelerce kalınlıkta devasa buz tabakalarının altına gömdü. Antarktika o dönemden beri bir derin dondurucuya hapsedilmiştir.

On dokuzuncu yüzyılda Amerikalı fok avcısı Kaptan John Davis kıtaya ayak bastığı bilinen ilk insan oldu; kalıcı yerleşim ise bazı ülkelerin kıta üzerinde araştırma istasyonları kurarak toprak ilhakı için birbiriyle yarıştığı yirminci yüzyılda başladı. İlk Sovyet istasyonu Mirny 13 Eylül 1956'da kıyıya yakın bir yere kuruldu ve iki yıl sonra buradan yola çıkan bir keşif ekibi, jeomanyetik kutupta bir üs kurmak amacıyla anakaranın içlerine doğru ilerlemeye başladı.

Keşif seferi kar fırtınaları, gevşek kar, aşırı soğuk (−55°C) ve oksijen azlığı nedeniyle sürekli sekteye uğradıysa da, güney yarıkürede yaza denk gelen 16 Aralık günü nihayet jeomanyetik kutba ulaşıldı ve Vostok istasyonu kuruldu.

O günden bu yana araştırma üssünde, jeomanyetik ve atmosferik ölçümler yapmakla görevli, sayıları on iki ile yirmi beş arasında değişen bilim insanı ve mühendisten oluşan bir ekip bulunuyor. İstasyonun temel amaçlarından biri, eski zaman iklimlerinin donmuş kayıtlarına ulaşabilmek için altta yatan buzulu delerek sondaj yapmak. 1970'lerde mühendisler 952 metre derinlikte bir grup buzul çekirdeğini delerek, günümüzden on binlerce yıl önceki son buzul

çağında oluşmuş bir buz tabakasına ulaştılar. 1980'li yıllarda yeni araçların gelmesiyle araştırmacılar 2202 metre derinliğe inebildi. 1996'ya gelindiğinde 3623 metre derinliğe ulaşmışlardı: 420.000 yıl önce oluşan yüzey buzuna dek uzanan, derinliği iki kilometreyi aşan bir delik.

Derken sondaj durduruldu çünkü sondaj deliğinin altında tuhaf bir şey saptandı. Aslında, Vostok istasyonunun altında sıradışı bir şey olduğu daha öncesinde, 1974 yılında bölgede İngilizler tarafından yapılan sismik incelemeler sırasında, buzun yaklaşık 4 kilometre altında 10.000 kilometrekarelik bir alanı kapsayan anormal sonuçlar elde edildiğinde saptanmıştı zaten. Rus coğrafyacı Andrey Petrovich Kapitsa, radarda saptanan bu anormalliğe yol açan şeyin, buzun altında hapsolmuş ve gerek aşırı yüksek basıncın gerekse alttan gelen jeotermal enerjinin etkisiyle donmaksızın korunabilmiş çok büyük bir göl olduğunu ileri sürdü. 1996'da yapılan uydu ölçümleri Kapitsa'nın tahminini doğruladı ve derinliği 500 metreye varan (sıvı yüzeyin üst sınırından dibe kadar olan derinlik), Ontario Gölü büyüklüğünde bir buzulaltı gölünü ortaya çıkardı. Araştırma ekibi göle Vostok Gölü adını verdi.

Buzun altındaki bu kadim çağlardan kalma gölün bulunmasının ardından, sondaj deliği eşi benzeri bulunmayan bu ortama yaklaştıkça Vostok istasyonundaki sondaj bütünüyle farklı bir anlam kazandı. Vostok Gölü, milyonlarca değilse bile yüz binlerce yıldan beri dünya yüzeyinden yalıtılmış kayıp bir dünyaydı.* Göl, içindeki canlı organizmaları mutlak bir karanlık ve soğuğun içine hapsederek dış dünyayla olan bağını koparmadan önce burada yaşayan hayvanlara, bitkilere, alglere ve mikroplara ne olmuştu? Gölde yaşam tamamen silinmiş miydi, yoksa bu canlılardan bir kısmı buzul yüzeyinin kilometrelerce altında sağ kalmayı başarmış, hatta

* Gölün üzerindeki buzulun tabanının oluşumu dört yüz bin yıldan eskiye tarihleniyor ama göl çok daha uzun zaman önce donmuş olabilir. Günümüzdeki buzulun daha eski buzulların yerini mi aldığı, yoksa gölün buzul çağları arasında buzsuz dönemler mi geçirdiği açıklığa kavuşmamıştır.

buradaki ortama uyum mu sağlamıştı? Bu dayanıklı organizmalar hayatta kalabilmek için aşırı ortam koşullarıyla (yüzeydeki bir göldeki basıncın üç yüz katını uygulayan kalın buz tabakasının ağırlığı altındaki suyun dondurucu soğuğu ve zifiri karanlık ortamı) başa çıkmış olmalıydı. Hâlbuki yanardağların kavurucu kükürtlü kenarları, asit gölleri, hatta okyanus yüzeyinin binlerce metre altındaki derin ve karanlık çukurlar gibi beklenmedik yerlerde bile şaşırtacak kadar çok yaşam türü varlığını sürdürebilir. Belki Vostok'un desteklediği, kendine has bir *ekstremofil* ekosistemi vardı.*

Buzun derinlerinde bir gölün keşfi, 1980 yılında neredeyse sekiz yüz milyon kilometre uzaktaki bir başka keşif sayesinde, Voyager 2 uzay aracının çektiği, Jüpiter'in uydusu Europa'nın, altındaki bir okyanusu ele veren işaretler taşıyan buzlu yüzeyinin fotoğraflarından ötürü daha da büyük anlam kazandı. Eğer Antarktika'daki bir buzulun kilometrelerce altına gömülü yaşam yüz binlerce yıl varlığını sürdürebiliyorsa, Europa'nın batık okyanusları da dünya dışı yaşamı barındırıyor olabilirdi belki. Vostok Gölü'nde yaşam arayışı, gezegenimizin ötesine uzanan daha da heyecan verici bir maceranın provası haline gelmişti.

Sondaj, göl yüzeyinin 100 metre üzerine ulaşıldığı 1996 yılında, yüzeydeki bitkiler, hayvanlar, mikroplar ve kimyasalların bulaşmış olabileceği, kerosene batmış sondaj matkabının gölün el değmemiş sularıyla temas etmesini önlemek için durduruldu. Bununla birlikte Vostok Gölü'nün suyu daha önceden çıkarılan buz çekirdekleri sayesinde incelenmişti zaten. Termal akıntılar göl suyunu öyle bir yönlendirir ki, buzdan tavanın tam altında sürekli bir donma-erime döngüsü oluşur. Bu süreç göl mühürlendiğinden bu yana devam edegeldiği için, gölün tavanını buzulun kendisi değil, gölün onlarca metre yukarısına uzanan ve *akresyon* buzu olarak da bilinen, donmuş göl suyu oluşturmaktadır. Daha önceki sondaj çalışmalarında elde edilen buz çekirdekleri bu kadar derinden çıkarılmıştı ve 2013

* Ekstrem, yani uç koşullarda (bizim açımızdan bakıldığında) yaşayan organizmalar.

yılında Vostok akresyon buzu çekirdeklerinin ilk detaylı incelemesi yayımlandı.[1] Çalışmanın sonucuna göre, buzun altında kapalı kalan göl bakteriler, mantarlar ve protozoadan tutun, yumuşakçalara, solucanlara, şakayıklara, hatta eklembacaklılar gibi daha karmaşık hayvanlara varan geniş bir organizmalar ağı barındırıyordu. Hatta bilim insanları, bu canlıların habitatları ve ekolojilerinin yanı sıra ne tür bir metabolizmaya sahip olduğunu bile belirleyebilmişti.

Bu bölümde odaklanmak istediğimiz konu Vostok'un yadsınamayacak ölçüde hayranlık uyandırıcı biyolojisi değil, binlerce hatta milyonlarca yıldan beri yalıtılmış bir ekosistemin nasıl olup da hayatta kalabildiği. Gerçekten de Vostok dünyanın içinde barınan, dört milyon yıldan beri güneş kaynaklı fotonlar hariç bütün girdilere kendini kapatmış; büyük yanardağ patlamaları, asteroit çarpmaları ve iklim kaymaları karşısında, zengin çeşitlilik gösteren ekosistemini koruyabilmiş bir tür mikro-evren olarak düşünülebilir. Yaşamın engin karmaşıklığı, ortam koşullarındaki aşırı değişimlere nasıl olur da binlerce, hatta milyonlarca yıl dayanarak gelişmeye devam edebilir?

Vostok biyoloji ekibinin üzerinde çalıştığı malzemenin bir parçası bize ipucu verebilir: donmuş göl suyundan elde edilmiş birkaç mikrogramcık kimyasal madde. Bu kimyasal, gezegenimizdeki yaşamın devamlılığı ve çeşitliliği açısından elzemdir ve bilinen evrenin en olağanüstü molekülünü içerir. Bu moleküle DNA diyoruz.

Vostok DNA çalışmasını, ABD'nin Bowling Green Eyalet Üniversitesi merkezli bir grup yürütüyor. Ekip, Vostok Gölü suyundan elde edilen milyonlarca DNA parçasının dizisini okumak için, daha önce insan genomunun şifresini çözmek için de kullanılmış olan bir tür DNA dizileme teknolojisi kullandı. Daha sonra Vostok DNA'sını, bütün dünyadan toplanmış binlerce organizmanın genomlarından okunmuş gen dizilerini kapsayan veritabanlarıyla karşılaştırdılar. Sonuçta, Vostok'tan elde edilen dizilerin, buzun üzerinde, özellikle de Vostok Gölü'ne az çok benzeyen soğuk göllerde ve derin, karanlık deniz çukurlarında yaşayan bakteriler,

mantarlar, eklembacaklılar ve diğer canlıların genleriyle özdeş ya da çok benzer olduğunu buldular. Bu gen benzerlikleri sayesinde ekip, buzun altında DNA imzasını bırakmış bu organizmaların olası doğasına ve alışkanlıklarına ilişkin sağlam bir temele dayalı tahminler yürütebilmiştir.

Ama Vostok organizmalarının yüz binlerce yıl buzun altında hapsolduğunu unutmayın. Dolayısıyla bu organizmalarla buzun üzerinde yaşayan canlıların DNA dizileri arasındaki benzerlik, göl ve sakinleri buzun altına hapsolmadan önce Antarktika'nın florası ve faunasının parçası olarak yaşamış organizmaların ikisinin de ortak atası olmasından kaynaklanmaktadır. O atasal organizmaların gen dizileri buzun üstünde ve altında, binlerce kuşak boyunca birbirinden bağımsız olarak kopyalanmıştır. Ancak bu uzun kopyalama olayları zincirine rağmen, aynı genlerin ikiz biçimleri neredeyse özdeş kalmıştır. Gerek buzun üstünde gerekse altında yaşayan organizmaların biçimini, özelliklerini ve işlevini belirleyen karmaşık genetik bilgi her nasılsa yüz binlerce yıl boyunca, aslına sadık kalınarak neredeyse sıfır hatayla iletilmiştir.

Bu, genetik bilginin bir kuşaktan ötekine aktarılırken aslına sadık kalarak kendini kopyalayabilme becerisi –yani kalıtım dediğimiz şey– hiç kuşkusuz yaşamın merkezindedir.

DNA şifresini taşıyan genler, proteinleri ve enzimleri kodlar ve bunlar da metabolizma yoluyla bitkiler ile mikroorganizmalardaki fotosentez pigmentlerinden hayvanlardaki koku duyusu reseptörlerine ya da kuşların esrarengiz manyetik pusulasına dek her bir canlı hücrenin her bir biyomolekülünü, aslına bakarsanız her canlı organizmanın her özelliğini oluşturur. Pek çok biyolog kendini kopyalamanın ("self-replication") yaşamın belirleyici özelliği olduğunu savunur. Ancak canlılar öncelikle kendilerini oluşturmalarını sağlayan talimatları kopyalayamazlarsa, kendilerini de kopyalayamazlar. O nedenle kalıtım –genetik bilginin yüksek sadakatle kopyalanması– yaşamı mümkün kılar. İkinci bölümden hatırlarsanız, Erwin Schrödinger'i genlerin kuantum mekaniğine uyan varlıklar

olduğuna ikna eden şey kalıtımın gizemi, yani genetik bilginin bir kuşaktan sonrakine aslına bu denli sadık kalarak aktarılmasıydı. Peki ama Schrödinger haklı mıydı? Kalıtımı açıklamak için kuantum mekaniğine ihtiyacımız var mı? Şimdi işte bu soruya geri döneceğiz.

Sadakat

Canlıların genomlarını hatasız kopyalamasını sıradan bir durum olarak algılama eğilimindeyiz, oysa bu aslında yaşamın en çarpıcı ve olmazsa olmaz yönlerinden biri. DNA replikasyonunda, mutasyon dediğimiz kopyalama hatalarının oranı genel olarak milyarda birin altındadır. Bu olağanüstü hatasızlık düzeyini kafanızda canlandırabilmek için bu kitaptaki bir milyon civarında harfi, noktalama işaretini ve ara boşlukları düşünün. Şimdi aşağı yukarı aynı boyutlarda bin kitabın bulunduğu bir kütüphanede olduğunuzu ve işinizin de her bir karakteri ve boşluğu aslına sadık kalarak kopyalamak olduğunu hayal edin. Sizce kaç hata yaparsınız? Matbaa icat edilmeden önce ortaçağda el yazmalarını birebir kopyalamak için ellerinden geleni yapan müstensihlerin görevi tam olarak buydu işte. Ancak ortaçağdan kalma metinlerin birbirinden hayli farklı kopyalarının da gösterdiği gibi, onca çabaya rağmen yaptıkları iş hiç de şaşırtıcı olmayarak hatalarla doluydu. Bilgisayarlar bilgiyi elbette çok yüksek bir sadakatle kopyalayabilme becerisine sahiptir ama bunu modern elektronik dijital teknolojinin olanakları sayesinde yapabilirler. Bir de ıslak, yumuşak bir malzemeden bir kopyalama makinesi yaptığınızı hayal edin. Sizce böyle bir makine kopyaladığı bilgiyi okurken ve yazarken kaç hata yapar? İşte o ıslak, yumuşak malzeme vücudunuzdaki hücrelerse ve sözünü ettiğimiz bilgi DNA şifresiyse eğer, o zaman hata payı milyarda birin altındadır.

Aslına sadık kalarak kopyalama işlemi yaşam açısından kritik önem taşır çünkü canlı dokuların olağanüstü karmaşıklığı, aynı derecede karmaşık, tek bir hatası bile ölümcül olabilecek bir talimatlar

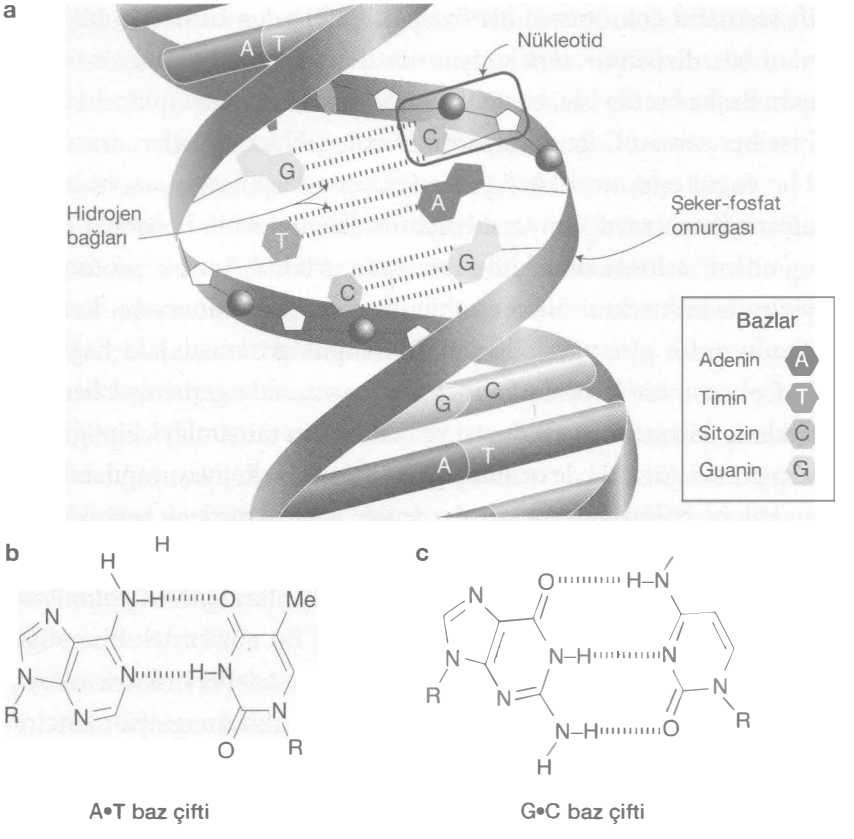
dizisi gerektirir. Hücrelerimizdeki genom, on beş bin civarında geni kodlayan yaklaşık üç milyar genetik harften oluşur; hâlbuki Vostok buzunun altında yaşayanlar gibi kendini kopyalayabilen en basit mikroorganizmaların genomu bile birkaç milyon genetik harfle yazılmış binlerce gen içerir. Organizmaların çoğu her kuşakta birkaç mutasyonu kaldırabilirse de, bir avuç mutasyondan fazlasının bir sonraki kuşağa aktarılması, insanlarda genetik hastalıklar, hatta ölü doğum şeklinde ortaya çıkan ciddi sorunlara yol açabilir. Bunun dışında vücut hücrelerimiz –kan hücreleri, deri hücreleri vb.– çoğalırken, oluşacak yavru hücrelere aktarmak üzere DNA'sını da kopyalamak zorundadır. Bu süreçte meydana gelen hatalar kansere yol açar.*

Kuantum mekaniğinin kalıtımdaki önemini anlamak için önce 28 Şubat 1953 tarihine, Francis Crick'in Cambridge'de Eagle bara dalıp James Watson'la birlikte "yaşamın sırrını bulduklarını" ilan ettiği âna dönmemiz gerek. Crick ve Watson'ın aynı yıl içinde yayımlanan dönüm noktası niteliğindeki makalesinin[2] aydınlattığı yapı ve basit kurallar dizisi yaşamın en temel sırlarından ikisine açıklama getiriyordu: biyolojik bilginin nasıl kodlandığı ve nasıl kalıtıldığına.

Genetik kodla ilgili pek çok anlatıda vurgulanan DNA'nın çift sarmal yapısı aslında ikincil öneme sahip bir özelliktir denebilir. Bu özellik gerçekten de olağanüstüdür ve DNA'nın zarif yapısı tişörtlerde, internet sitelerinde, hatta mimaride karşımıza çıkan, bilimin en sembolik görüntülerinden biri haline gelmiştir haklı olarak. Ama çift sarmal aslında sadece bir iskelettir. DNA'nın gerçek sırrı sarmalın desteklediği şeyde yatar.

İkinci bölümde kısaca değindiğimiz gibi, DNA'nın sarmal yapısını (şekil 7.1) oluşturan şeker-fosfat omurgası, nükleik asit bazlarının –guanin (G), sitozin (C), timin (T) ve adenin (A)– oluşturduğu asıl mesajı taşır. Bu doğrusal dizinin bir şifre olduğunu fark eden Watson ve Crick bunun genetik kod olduğunu ileri sürmüştür.

* Kanserlerin nedeni, hücre çoğalmasını kontrol eden genlerde meydana gelen mutasyonların kontrolsüz hücre çoğalmasına ve tümör oluşumuna yol açmasıdır.



Şekil 7.1: DNA'nın yapısı: (a) Watson ve Crick'in çift sarmal modelini göstermektedir; (b) genetik harflerden ikisi olan A ve T'nin eşleşmesini yakından göstermektedir; (c) genetik harflerin diğer ikisi olan G ve C'nin eşleşmesini yakından göstermektedir. Her iki örnekte de bazlar arasındaki hidrojen bağları –ortaklaşılan protonlar– noktalı çizgilerle gösterilmiştir. Bu standart (kanonik) Watson ve Crick baz eşleşmesinde bazlar totomerik olmayan, normal biçimlerindedir.

Tarihe geçen makalenin son satırında Watson ve Crick, DNA'nın yapısının aynı zamanda yaşamın ikinci büyük gizemine de bir çözüm ürettiğini öne sürüyordu: "Varsaydığımız özgül eşleşmenin, genetik maddenin kopyalanması için olası bir mekanizma düşündürdüğü dikkatimizden kaçmadı." İkilinin dikkatinden kaçmayan şey,

çift sarmalın çok önemli bir özelliği, ipliklerden birindeki bilginin –yani baz dizisinin– ters kopyasının diğer iplikte bulunuyor olmasıydı: Başka bir deyişle, bir iplikteki A her zaman karşı iplikteki T ile, G ise her zaman C ile eşleşiyordu. Karşıt ipliklerin bazları arasındaki bu özgül eşleşmeyi (A:T ya da G:C eşleşmesi) sağlayan, hidrojen bağları denen zayıf kimyasal bağlardı. İki molekülü bir arada tutan bu "tutkal" aslında moleküller arasında ortaklaşılan bir protondur; öykümüzde merkezi öneme sahip olduğu için az sonra bu konuya daha ayrıntılı gireceğiz. Eşleşen DNA iplikleri arasındaki bağların zayıf olması, bir kopyalama mekanizmasını akla getirmişti hemen: İpliklerin birbirinden ayrılması ve her birinin tamamlayıcı ipliği için kalıp görevi görmesiyle orijinal iplik çiftinin iki kopyası yapılabilirdi.

Hücre bölünmesi sırasında genler kopyalanırken gerçekleşen de tam olarak budur zaten. Çift sarmalın, her ikisi de tamamlayıcısının bilgisini içeren iki ipliği birbirinden ayrılarak, *DNA polimeraz* enziminin ayrık ipliklere erişimini sağlar. Bu enzim tek bir ipliğe tutunup nükleotid zinciri boyunca genetik harfleri okuya okuya ilerler ve bu sırada neredeyse hiç hata yapmaksızın uzayan zincire tamamlayıcı bazı ekler. A gördüğü yere T, G gördüğü yere C ekleyerek tamamlayıcı kopyanın bütününü oluşturana kadar devam eder. Aynı işlem diğer iplikte de gerçekleşir, böylece her biri yavru hücrelerden biri için olmak üzere orijinal çift sarmalın iki kopyası oluşturulur.

Basit görünüşü aldatıcı olan bu işlem, gezegenimizdeki tüm yaşamın yayılmasının temelinde yatar. Fakat Schrödinger 1944'te kalıtımın olağanüstü yüksek sadakat derecesinin klasik yasalarla açıklanamayacağını, genlerin "düzensizlikten doğan düzen" kurallarını esas alamayacak kadar küçük olduğunu iddia etmiş, genlerin bir tür *aperiyodik kristal* olması gerektiğini ileri sürmüştü. Peki genler gerçekten de aperiyodik kristaller midir?

Tuz tanecikleri örneğindeki gibi, kristallerin ayırt edici biçimleri vardır. Sodyum klorür (sofra tuzu) kristalleri küp şeklindeyken, buzdaki su molekülleri altıgen prizmalar oluşturarak, muhteşem bir

çeşitlilik gösteren kar tanelerini yapar. Bu biçimler, moleküllerin kristal içine nasıl sıkıştığının birer sonucudur; dolayısıyla kristallerin biçimini belirleyen aslında moleküllerin biçimini belirleyen kuantum yasalarıdır. Ancak standart kristaller son derece düzenli yapılarına rağmen çok fazla bilgi taşımaz çünkü tekrarlanan her birim, tıpkı mozaik desenli duvar kâğıdında olduğu gibi, diğerlerinin aynısıdır; dolayısıyla basit bir kural kristalin bütününü tanımlar. Schrödinger, genlerin aperiyodik kristaller olduğunu, yani standart kristallerdeki gibi benzer şekilde tekrarlanan bir moleküler yapıya sahip olmakla birlikte, tekrarlar arası aralıkların ya da periyotların (o nedenle "aperiyodik" demiştir) veya tekrarlar içindeki yapıların değişmesi ile ayarlandığını, yani duvar kâğıdından çok karmaşık bir duvar halısına benzediğini ileri sürmüştür. Ayarlanan bu tekrarlı yapıların genetik bilgiyi şifrelediğini ve onların da kristaller gibi kuantum düzeyinde kodlanmış olduğunu öne sürmüştür. Unutmayın ki bütün bunlar Watson ile Crick'ten on yıl kadar önceydi; yani genin yapısı, hatta genlerin neden yapılmış olduğu bile bilinmiyordu henüz.

Schrödinger haklı mıydı? Öncelikle, DNA şifresinin gerçekten de tekrarlanan yapılardan oluştuğu (DNA bazları) ve tekrarlanan her birimin yerine dört farklı bazdan birinin gelmesi anlamında aperiyodik olduğu açıktır. Genler gerçekten de Schrödinger'in öngördüğü şekilde aperiyodik kristallerdir. Ancak aperiyodik kristallerin bilgiyi ille de kuantum düzeyinde kodlaması gerekmez; örneğin, bir fotoğraf levhasındaki düzensiz grenler gümüş tuzu kristalleridir ama kuantum özelliği göstermez. Genlerin kuantum varlıklar olduğu konusunda Schrödinger'in haklı olup olmadığını anlamak için DNA bazlarının yapısına, özellikle de tamamlayıcı baz eşleşmelerinde T ile A ve C ile G arasında oluşan bağlara daha derinlemesine bakmamız gerek.

Genetik şifreyi taşıyan DNA eşleşmesinin temeli tamamlayıcı bazları bir arada tutan kimyasal bağlardır. Daha önce de bahsettiğimiz gibi hidrojen bağları denen bu bağlar, karşıt ipliklerde bulunan tamamlayıcı bazlardaki iki atomun ortaklaştığı hidrojen atomu

çekirdeğinden, yani tek bir protondan oluşur ve karşılıklı eşleşen bazları bir arada tutan işte bu bağlardır (şekil 7.1). A bazı T bazıyla eşleşir çünkü her A, protonları ancak T ile arasında hidrojen bağları kurabilecek konumda tutar. Bir A bazı C bazıyla eşleşemez çünkü protonlar karşılıklı bağ kurabilmeye elverişli konumda değildir.

Nükleotid bazları arasındaki bu proton aracılı eşleşme, kopyalanarak kuşaktan kuşağa aktarılan genetik şifrenin *ta kendisidir.* Üstelik bu, kullanıldıktan sonra yok edilen "tek kullanımlık" şeride yazılmış şifreli mesaj gibi tek seferlik bir bilgi aktarımı değildir.

Genetik şifre hücrenin ömrü boyunca, yaşamın motorları olan enzimleri yapmakta kullanılan protein yapım mekanizmasını yönetmek ve hücrenin diğer bütün etkinliklerini düzenlemek için sürekli okunmak zorundadır. Bu işlem, tıpkı DNA polimeraz gibi DNA zinciri boyunca kodlayıcı protonların konumlarını okuyan *RNA polimeraz* enzimi tarafından gerçekleştirilir. Nasıl ki bir mesajın anlamı ya da bir kitabın olay akışı sayfada yazılı olan harflerin konumuyla anlaşılıyorsa, çift sarmalın yapısındaki protonların konumu da yaşamın hikâyesini aynı şekilde belirler.

İsveçli fizikçi Per-Olov Löwdin, geçmişe dönüp bakınca çok açık görünen bir duruma işaret eden ilk kişi olmuştur: Protonların konumunu belirleyen klasik yasalar değil, kuantum yasalarıdır. O halde yaşamı olası kılan genetik kod da kaçınılmaz olarak bir kuantum şifredir. Schrödinger haklıydı: Genler kuantum harflerle yazılır ve kalıtımda sadakati sağlayan klasik yasalar değil, kuantum yasalarıdır. Nasıl ki bir kristalin biçimi kuantum yasalarınca belirleniyorsa, burnunuzun biçimini, göz renginizi, karakter özelliklerinizi de anne ya da babanızdan kalıtılan tek bir DNA molekülünün yapısında işleyen kuantum yasaları belirler. Yaşam, Schrödinger'in öngördüğü gibi, organizmaların yapısı ve davranışından başlayıp DNA ipliklerindeki protonların konumuna dek başından sonuna düzen içinde –düzenden doğan düzen ilkesiyle– çalışır ve kalıtımda aslına sadık kalmayı sağlayan da işte bu düzendir.

Ama kuantum kopyalayıcılar bile zaman zaman hata yapabilir.

Sadakatsizlik

Genetik şifrenin kopyalanması hep mükemmel olsaydı, gezegenimizde yaşamın evrimleşmesi ve pek çok güçlüğe uyum sağlaması mümkün olmazdı. Binlerce yıl önce ılıman Antarktika göllerinde yüzen mikroorganizmalar örneğin, nispeten sıcak ve aydınlık bir ortamda yaşama iyi uyum sağlamış olacaktı. Dünyaları buzdan bir çatıyla örtüldüğünde, genomlarını aslına yüzde 100 sadık kalarak kopyalayan mikroorganizmaların ortadan kalkmış olacağını neredeyse kesin olarak söyleyebiliriz. Fakat birçok mikrop kopyalama işlemi sırasında birkaç hata yapmış, bunun sonucunda kendilerinden az da olsa farklı mutant yavrular oluşmuştur. Farklılıkları sayesinde daha soğuk ve karanlık ortamda hayatta kalabilmek açısından daha donanımlı olan yavru hücreler büyüyüp serpilmiş ve zaman içinde, mükemmel olmayan binlerce kopyalama olayının ardından, buzun altında hapsolmuş mikropların soyundan gelen kuşaklar yeraltı gölündeki yaşama daha iyi uyum sağlamıştır.

Daha önce de söylediğimiz gibi, Vostok Gölü'nde mutasyon (DNA kopyalama hataları) yoluyla gerçekleşen bu adaptasyon süreci, yeryüzünde milyarlarca yıldan beri devam eden süreci yansıtan bir mikro-evrendir. Dünyamız uzun tarihi boyunca, büyük yanardağ patlamalarından buz devrine ve meteor çarpmasına varana dek pek çok büyük felaketle karşılaşmıştır. Yaşam, hataları kopyalayarak uyum sağlama becerisini göstermeseydi çoktan yok olur giderdi. Aynı derecede önemli olarak mutasyonlar gezegenimizde ilk gelişen basit mikroorganizmaların günümüzün büyük çeşitlilik gösteren biyosferine dönüşmesinde de yönlendirici olmuştur. Azıcık sadakatsizlik, yeterli zaman tanınırsa büyük işler başarır.

Erwin Schrödinger, 1944 tarihli *What is Life?* [*Yaşam Nedir?*] adlı kitabında, kuantum mekaniğinin kalıtımda aslına sadakatin kaynağı olduğunu ileri sürmenin yanı sıra, bir başka iddialı görüş daha ortaya attı. Mutasyonların gen içinde bir tür kuantum sıçramayı temsil ediyor olabileceğini düşündü. Bu olabilir mi? Bu

soruyu yanıtlamak için öncelikle evrim teorisinin kalbine giden bir ihtilaftan söz edelim.

Zürafa, bezelye ve sirkesineği

Evrimin Charles Darwin tarafından "keşfedildiği" söylenir sıklıkla; oysa organizmaların jeolojik zaman boyunca değiştiği, fosillerin incelenmesi sayesinde Darwin'den en az yüz yıl öncesinde doğa bilimcilerin aşina olduğu bir gerçekti. Nitekim Charles'ın büyükbabası Erasmus Darwin ateşli bir evrim yanlısıydı. Fakat Darwin öncesinin en ünlü evrim kuramı, şâşaalı bir ismi olan Fransız aristokrat Jean-Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck'tı.

1744 doğumlu Lamarck bir Cizvit rahip olarak eğitim görmüştü, fakat babasının ölümünden sonra kendisine bir at almaya yetecek kadar miras kalınca, Prusya'ya karşı dövüşmek üzere Pomeranya Savaşı'na asker olarak katıldı. Askerliği yaralandığı için kısa kesilince Paris'e döndü ve bir yandan bankada kâtip olarak çalışırken bir yandan da boş zamanlarında botanik ve tıp eğitimi almaya başladı. Sonunda Jardin du Roi'da (Kralın Bahçesi) botanik asistanı olarak bulduğu işe, devrim sırasında işvereninin kellesi uçurulana kadar devam etti. Lamarck devrim sonrası Fransa'sında tutunmayı başardı, Paris Üniversitesi'ne hoca oldu ve çalışmalarının odağını bitkilerden omurgasızlara kaydırdı.

Lamarck, en azından Anglosakson âleminde kıymeti pek bilinmeyen büyük bilim insanlarından biridir. "Biyoloji" terimini (Yunanca *bios* yaşam anlamına gelir) ilk kullanan kişi olmakla kalmamış, Darwin'den yarım asır önce evrimsel değişim için hiç değilse mantıklı bir mekanizmaya dayalı bir kuram ileri sürmüştür. Lamarck, organizmaların vücutlarını yaşamları süresince çevre koşullarına göre değiştirebildiğine dikkat çekmiştir. Sözgelimi, fiziksel açıdan çalışma koşulları ağır olan çiftçilerin vücudu, bankadaki kâtiplere göre daha kaslı olur. Lamarck, sonradan kazanılan bu değişikliklerin çocuklara ve sonraki kuşaklara aktarılabileceğini ve böylece

evrimsel değişimin iticisi olabileceğini iddia ediyordu. En bilinen ve en fazla alay konusu olan örneği, ağacın üst dallarındaki yapraklara ulaşmak için boynunu uzatan hayalî antiloptur. Lamarck, sonradan kazanılmış bir özellik olan uzun boynun antilobun torunlarına aktarıldığını ve sonraki soyların da aynı süreçten geçmiş olduğunu ileri sürüyordu, ta ki sonunda zürafalar evrimleşene dek.

Bir hayvanın yaşamı süresince edindiği özelliklerin genellikle kalıtsal olmadığına ilişkin fazlasıyla kanıt bulunduğu için, Lamarck'ın kalıtsal adaptif değişim kuramı Anglosakson dünyasında genellikle alay konusu olmuştur. Örneğin, yüzyıllar önce Avustralya'ya göç etmiş açık tenli kuzey Avrupalılar dışarıda fazla vakit geçirirlerse genellikle bronzlaşırlar ama güneş olmadığında bu insanların çocukları da ataları kadar beyazdır. Güçlü güneş ışınlarına cevaben gelişen bir adaptif değişim örneği olan bronzlaşmanın kalıtsal olmadığı açıktır. Dolayısıyla *Türlerin Kökeni*'nin 1859 yılında yayımlanmasının ardından, Lamarck'ın evrim teorisi Darwin'in doğal seçilim kuramının gölgesinde kalmıştır.*

Günümüzde öne çıkan kuram Darwin'in evrim versiyonudur; yani amansız doğanın iyi uyum sağlayanı mükemmel olmayanlardan ayıklaması sayesinde en iyi uyum sağlayanın hayatta kaldığı görüşü. Fakat doğal seçilim evrim öyküsünün yarısıdır sadece. Evrimin başarılı olması için, doğal seçilimin üzerinde işe başlayacağı bir varyasyon kaynağına ihtiyacı vardır. Bu Darwin'in çok kafasını karıştırıyordu çünkü daha önce de gördüğümüz gibi kalıtım son derece yüksek bir sadakatle işler. Bu durum, anne babadan farklı göründükleri için, eşeyli üreyen organizmalarda hemen göze çarpmayabilir. Ancak eşeyli üreme, yavru döl oluşturmak için mevcut ebeveyn özelliklerini yeniden karıştırmaktan ibarettir. Aslında, on dokuzuncu yüzyılın başlarında eşeyli üremede özelliklerin karışması, daha çok boyaların karıştırılmasına benzetilirdi. Yüzlerce

* Buna, tropikal bölgelerde yolculuk yaparken geçirdiği sıtma nöbeti sırasında, aslında Darwin'inkiyle aynı fikre ulaşan büyük İngiliz doğa bilimci ve coğrafyacı Alfred Russel Wallace'a atfen Wallace'ın doğal seçilim kuramı da diyebiliriz.

çeşit renk renk boya alıp da bir kutudaki boyanın yarısını bir başka kutudakinin yarısıyla karıştırırsanız ve bu işlemi binlerce kez tekrarlarsanız, sonunda yüzlerce kutu gri boya elde edersiniz; bireysel varyasyon bu karıştırma sürecinde giderek topluluk ortalamasına dönüşür. Oysa Darwin'in ihtiyacı olan şey, evrimsel değişimin kaynağıysa eğer, varyasyonun sürekli korunması, hatta eklenerek artmasıydı.

Darwin evrimin, doğal seçilimin küçücük kalıtsal varyasyonlar üzerinde etki göstermesiyle çok tedrici bir şekilde ilerlediğine inanıyordu:

> Doğal seçilim sadece, her biri muhafaza edilmiş canlıya fayda sağlayan ve sonsuz derecede küçük kalıtsal değişikliklerin korunması ve birikmesiyle iş görebilir; çağdaş yerbilim büyük bir vadinin tek bir tufan dalgası tarafından oyulmuş olabileceği gibi görüşleri nasıl bir tarafa bıraktıysa, doğal seçilim de sürekli olarak yeni organik varlıkların yaratıldığı ya da bunların yapılarında büyük ve ani değişimler olduğu inancını aynı şekilde bir kenara atacaktır.[3]

Fakat evrim için gereken bu hammaddenin kaynağı –"sonsuz derecede küçük kalıtsal değişimler"– büyük bir gizemdi. On dokuzuncu yüzyıl biyologları, hilkat garibelerini ve soyundan farklı kalıtsal özellikler gösteren canlıları gayet iyi biliyorlardı. Örneğin, on sekizinci yüzyılın sonunda New England'daki bir çiftlikte doğan, bacakları aşırı derecede kısa bir kuzu çiftleştirilerek, çitlerin üzerinden atlayamadığı için yetiştirilmesi daha kolay olan kısa bacaklı Ancon koyunu varyetesi üretilmişti. Ancak Darwin bu varyetelerin (soyundan farklı özellik gösteren canlıların) evrimin sürükleyicisi olabileceğini düşünmüyordu çünkü bu tür değişiklikler çok büyük olduğundan yabanıl doğada hayatta kalması pek muhtemel olmayan garip canlıların oluşumuyla sonuçlanıyordu. Darwin,

kuramının işlemesi için ihtiyaç duyduğu sonsuz derecede küçük varyasyonları sağlayabilecek daha küçük ve fazla çarpıcı olmayan kalıtsal değişimler bulmalıydı. Bu sorunu hayatı boyunca hiç çözemedi. Hatta *Türlerin Kökeni*'nin sonraki baskılarında, kalıtsal küçük varyasyon oluşturabilmek için son çare olarak bir tür Lamarkçı evrim kuramına başvurdu.

Çözüm zaten kısmen de olsa Darwin sağken, ikinci bölümde tanıştığımız Gregor Mendel tarafından bulunmuştu. Mendel'in bezelyelerle yaptığı deneyler bezelye biçimi ya da rengindeki küçük varyasyonların gerçekten de *kararlı biçimde* aktarıldığını göstermişti. Yani işin can alıcı noktası şuydu ki bu özellikler karışmıyor, kuşaktan kuşağa aktarılıyor ve eğer özellik baskın değil de çekinikse bazı kuşakları atlayabiliyordu. Mendel, şimdi gen adını verdiğimiz bu kalıtsal "faktörler"in biyolojik özelliklerin şifresini taşıdığını ve biyolojik varyasyonların kaynağı olduğunu öne sürdü. Yani eşeyli üremeyi birbirine karışan boyalar yerine, inanılmaz bir renk ve desen çeşitliliği gösteren kavanozlar dolusu bilyeler olarak düşünün. Her kuşakta genlerin karışmasını, bir kavanozdaki bilyelerin yarısının bir başka kavanozdaki bilyelerin yarısıyla karışmasına benzetebiliriz. Binlerce kuşak sonrasında dahi her bilyenin kendi rengini koruyabilmesi gibi, kalıtsal özelliklerin de yüzlerce, binlerce kuşak boyunca değişmeksizin aktarılması son derecede önemlidir. Böylece genler, doğal seçilimin etki edebileceği kararlı bir varyasyon kaynağı oluşturur.

Mendel'in çalışmaları yaşadığı dönemde büyük ölçüde göz ardı edilmiş ve sonrasında da unutulmuştur; bu yüzden de bildiğimiz kadarıyla Darwin, Mendel'in "kalıtsal faktörler" kuramından ve kuramın karışma bilmecesine getirebileceği çözümden haberdar değildi. Dolayısıyla evrimin sürücü koltuğunda oturan kalıtsal değişimlerin kaynağını bulma sorunu, on dokuzuncu yüzyılın sonlarına doğru Darwin'in evrim teorisine olan desteğin azalmasına yol açtı. Ancak yirminci yüzyıla girdikten sonra Mendel'in fikirleri, bitki

melezleştirmesi üzerinde çalışan ve varyasyonun kalıtımını yöneten yasaları keşfeden botanikçiler tarafından tekrar canlandırıldı. Yeni bir şey bulduğunu düşünen her iyi bilim insanı gibi onlar da sonuçlarını yayımlamadan önce, mevcut bilimsel literatüre dönüp yayımlanmış çalışmaları incelediler ve bulduklarını sandıkları kalıtım yasalarının aslında yıllarca önce Mendel tarafından tanımlanmış olduğunu görünce şaşırıp kaldılar.

Artık "gen"* adını verdiğimiz Mendel faktörlerinin yeniden keşfedilmesi Darwin'in karışım bilmecesine bir çözüm getirmişti belki ama genler değişmeksizin aktarılıyor gibi göründüğünden, uzun vadedeki evrimsel değişimi yönlendirmek için gereken genetik çeşitliliğe kaynak bulma sorununu hemen çözememişti. Doğal seçilim her kuşakta gen bilyeleri karışımını değiştirecek şekilde etki gösterebilir ama kendi başına yeni bilye yapamaz. Bu kördüğüm, Mendel genetiğini yeniden keşfeden botanikçilerden biri olan Hugo de Vries tarafından çözülmüştür; de Vries bir patates tarlasında yürürken, alışılageldik kalp biçiminde değil de oval taç yaprakları olan, normal bitkiden daha uzun, tamamen yeni bir eşek otu varyetesi (*Oenothera lamarckiana*) bulmuştur. Bu çiçeğin bir "mutant" olduğunu anlamış, daha da önemlisi mutant özelliklerin sonraki soylara aktarıldığını, yani kalıtsal olduğunu *göstermiştir.*

Genetikçi Thomas Hunt Morgan, de Vries'in mutasyon çalışmasını 1900'lü yılların başında Columbia Üniversitesi'ne taşıyarak, deney yapmaya uygun sirkesinekleri üzerinde çalıştı. O ve ekibi, sinekleri güçlü asitlere, X ışınlarına ve toksinlere maruz bırakarak mutant elde etmeye çabaladılar. Nihayet 1909 yılında, beyaz gözlü bir sinek pupadan çıktı ve ekip, de Vries'in tuhaf biçimli eşek otlarında olduğu gibi sirkesineklerinde de mutant özelliğin Mendel genetiğine uygun biçimde aktarıldığını gösterdi.

* "Genetik" terimi ilk kez 1905 yılında, Mendel'in görüşlerinin destekçisi olan İngiliz genetikçi William Bateson tarafından kullanılmıştır. "Gen" terimiyse bundan dört yıl sonra Danimarkalı botanikçi Wilhelm Johannsen tarafından, bireyin dış görünüşü (fenotip) ile genleri (genotip) arasında ayrım yapabilmek için öne sürülmüştür.

Darwin'in doğal seçilim görüşünün Mendel genetiği ve mutasyon teorisiyle evliliği, sonunda neo-Darwinist sentez olarak bilinen yaklaşımı doğurdu. Bu yaklaşıma göre, mutasyonlar kalıtsal genetik çeşitliliğin nihai kaynağıdır, çoğu pek az etki gösterir, hatta bazen zararlı olur ama arada bir de ebeveynlerine göre daha iyi uyum sağlayan mutantlar yaratabilir. Sonra devreye doğal seçilim girerek bir toplulukta daha az uyum sağlayan mutantları ayıklarken, daha başarılı varyantların hayatta kalıp çoğalmasına izin verir. Sonunda mutantlar norm haline gelir ve evrim "sonsuz derecede küçük kalıtsal değişikliklerin korunması ve birikmesi" yoluyla ilerler.

Neo-Darwinist sentezin temel bileşenlerinden biri mutasyonların rastgele oluşmasıdır; varyasyon çevresel bir değişime yanıt olarak gelişmez. Ortam koşulları değiştiğinde, bir tür o değişimi izleyebilmek için –rastgele işleyen bir süreçle– doğru mutasyonun geleceği zamanı beklemek zorundadır. Bu, kalıtsal adaptasyonun –zürafanın boynunun uzamasında olduğu gibi– çevresel koşulların zorlamasından kaynaklandığını ve sonrasında da kalıtsal olarak aktarıldığını savunan Lamarckçı evrim görüşüyle ters düşer.

Yirminci yüzyılın başında kalıtsal mutasyonların, neo-Darwinistlerin inandığı gibi rastgele mi, yoksa Lamarckçıların inandığı gibi çevresel zorlamalara yanıt olarak mı geliştiği bilinmiyordu. Hatırlarsanız, Morgan sineklerde mutasyon yaratmak için zehirli kimyasallar ya da radyasyon kullanmıştı. Belki de sineklerde bu çevresel zorlamalara yanıt olarak, değişen koşullara rağmen hayatta kalabilmelerine yardım eden yeni varyasyonlar gelişmişti. Lamarck'ın zürafası gibi sinekler de metaforik anlamda *boyunlarını uzatmış*, sonra da bu adaptif özelliği kalıtsal bir mutasyon olarak sonraki kuşaklara aktarmış olabilirlerdi.

James Watson'ın doktora danışmanı Salvador Luria ile Indiana Üniversitesi'nden Max Delbrück'un 1943'te gerçekleştirdiği klasik deneyler bu rakip kuramları sınamak üzere tasarlanmıştı. O dönemde, evrimle ilgili çalışmalarda bakteriler, laboratuvarda üretme kolaylığı ve hızlı çoğalmaları nedeniyle sirkesineklerinin yerini

almıştı. Bakterilerin virüslerle enfekte olabildiği ama bu virüslere tekrar tekrar maruz kalmaları halinde, gelişen mutasyonlar sayesinde hızla direnç geliştirebildikleri biliniyordu. Bütün bunlar, rakip neo-Darwinist ve Lamarckçı mutasyon kuramlarını sınamak için ideal bir ortam sunuyordu. Luria ve Delbrück, viral enfeksiyona karşı dirençli bakteri mutantlarının toplumda zaten var olduğunu söyleyen neo-Darwinistlerin mi, yoksa bunların bir virüsün yarattığı çevresel zorlamaya yanıt olarak ortaya çıktığını söyleyen Lamarckçıların mı haklı olduğunu anlamak için çalışmaya koyuldular. Bu iki bilim insanı, ortamda virüs olsa da olmasa da mutantların hemen hemen aynı hızda ortaya çıktığını buldular. Bir başka deyişle, çevre koşullarının seçici baskısı mutasyon hızını etkilemiyordu. Bu deneyler ikiliye 1969'da Nobel Ödülü kazandırdı ve mutasyonun rastgele olduğu ilkesini modern evrim biyolojisinin köşe taşlarından biri haline getirdi.

Gelgelelim Luria ile Delbrück 1943 yılında deneylerini yaparken, gen bilyelerinin neyden yapılmış olduğu, dahası mutasyonların oluşmasında rol oynayan –bir bilyeyi bir başka bilyeye dönüştüren– fiziksel mekanizmalar bilinmiyordu. Watson ve Crick 1953'te çift sarmalın yapısını açıklığa kavuşturunca her şey değişti. Gen bilyelerinin DNA'dan yapılmış olduğu gösterildi. Böyle olunca mutasyonların rastgele oluşması ilkesi son derece mantıklı geldi, çünkü radyasyon ya da mutajenik kimyasallar gibi iyi bilinen mutasyon nedenleri DNA molekülüne zarar verme eğilimindeydi ve oluşan değişimin bir avantaj sağlayıp sağlamamasından bağımsız olarak etkiledikleri genlerde mutasyona yol açıyorlardı.

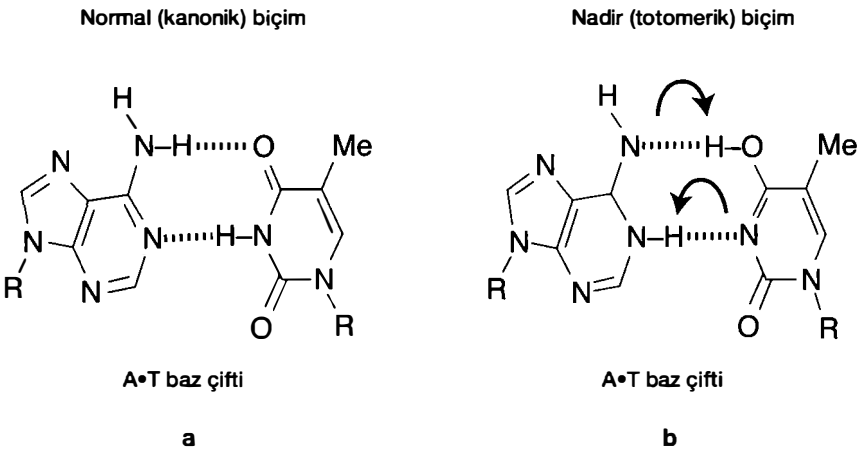
DNA'nın yapısıyla ilgili ikinci makalelerinde[4] Watson ve Crick, protonların molekül içindeki hareketiyle ilgili olan ve totomerizasyon denen bir sürecin mutasyonun bir nedeni olabileceğini öne sürdüler. Protonlar gibi temel parçacıkların hareketiyle ilgili herhangi bir sürecin kuantum mekaniğine dayalı olabileceğini artık anlamışsınızdır. O halde Schrödinger haklı mıydı? Mutasyonlar bir tür kuantum sıçraması mıdır?

Protonlarla kodlamak

Şekil 7.1'in alt yarısına tekrar bakın. Ortaklaşılan protondan oluşan hidrojen bağını, eşleşen bazların iki atomu (oksijen, O ya da azot, N) arasında noktalı çizgi şeklinde çizdiğimizi göreceksiniz. Ama proton bir parçacık değil midir? O halde neden tek bir nokta değil de noktalı çizgi olarak gösterdik? Nedeni elbette protonların hem parçacık hem dalga özelliği gösteren kuantum varlıklar olması: Dolayısıyla proton, iki baz arasında çalkalanıp duran yersizleşmiş bir varlık ya da bir dalga gibi davranır. H'nin şekil 7.1'deki konumu (protonun en olası konumunu göstermekte) iki baz arasındaki mesafenin tam ortasında olmayıp, iki iplikten birine daha yakındır. Bu asimetri DNA'nın son derece önemli bir özelliğinden sorumludur.

Bir A–T baz çiftini ele alalım: Bu eşleşmede ipliklerden birinde T, diğerindeyse A yer alır ve bazlar karşılıklı iki hidrojen bağıyla (protonlar) bir arada tutulur; protonlardan biri A'daki azot atomuna, diğeriyse T'deki oksijen atomuna daha yakın bulunarak (şekil 7.2a) A:T hidrojen bağının oluşmasını sağlar. Ama unutmayın ki "daha yakın" ifadesi, parçacıkların sabit konumda kalmayıp, sadece tünellemeyle erişilebilen konumlar da dahil, aynı anda pek çok farklı yerde bulunabilme olasılıklarını mesken tuttuğu kuantum dünyasında kaypak bir kavramdır. Genetik harfleri bir arada tutan iki protondan her biri ilgili hidrojen bağının karşı tarafına sıçrarsa, ikisi de karşıt iplikteki baza yaklaşır. Bu durum, her bazın *totomer* adı verilen alternatif biçiminin oluşumuyla sonuçlanır (şekil 7.2b). O nedenle DNA bazlarından her biri, hem Watson ve Crick'in çift sarmal modelindeki gibi yaygın kanonik biçiminde hem de kodlayıcı protonların yeni konumlara kaydığı daha nadir görülen totomeri şeklinde bulunabilir.

Fakat unutmayın ki DNA'daki hidrojen bağlarını oluşturan protonlar, genetik şifrenin kopyalanmasında kullanılan baz eşleşmesinin özgüllüğünden sorumludur. O halde kodlayıcı proton çifti –ters yönlerde– hareket ederse, sonuçta genetik şifreyi yeniden yazmış



Şekil 7.2: (a) Protonları normal konumda olan standart bir A–T baz çifti; (b) burada eşleşmiş protonlar çift sarmalın diğer tarafına geçerek A ve T'nin totomerik biçimlerini oluşturmuştur.

olur. Örneğin; eğer DNA ipliğindeki bir genetik harf T (timin) ise, bu bazın normal biçimi doğru olarak A ile eşleşir. Ancak T ile A arasında çift proton takası olursa, hem T hem de A, totomerlerine dönüşür. Protonlar tekrar geri sıçrayabilir elbette ama DNA ipliği kopyalanırken bazlar nadir görülen totomerik biçiminde* bulunuyorsa, o zaman yeni oluşan DNA ipliklerine yanlış bazlar eklenebilir. Totomerik T, A yerine G ile eşleşebileceği için eski iplikte A'nın bulunduğu yere yeni iplikte G gelebilir. Benzer şekilde, DNA kopyalanırken A totomerik biçiminde bulunuyorsa, o da T yerine C ile eşleşebilir; dolayısıyla eski iplikte T'nin bulunduğu yere yeni iplikte C gelir (şekil 7.3). Her iki durumda da yeni oluşan DNA iplikleri, DNA dizisinde meydana gelen ve sonraki kuşaklara kalıtsal olarak aktarılacak değişiklikleri, yani mutasyonları taşıyacaktır.

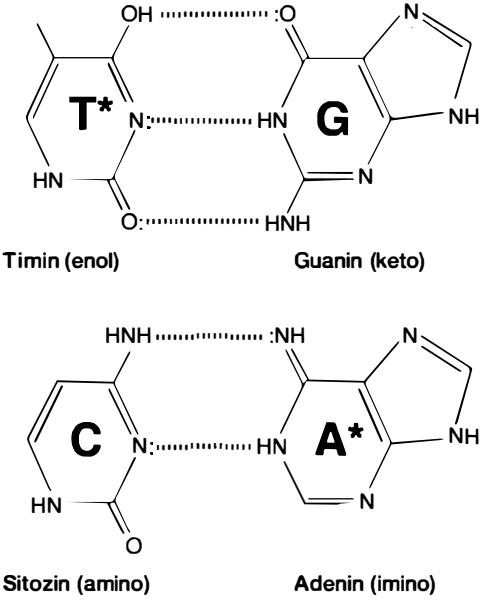
Bu hipotez tamamen mantıklı olmakla birlikte, ona doğrudan kanıt elde etmek çok zor olmuştur; ancak Watson ve Crick'in

* Guanin ve timinin alternatif totomerik biçimleri kodlayıcı protonların konumuna göre enol ya da keto, sitozin ve adenin totomerleri ise imino ya da amino formları olarak bilinir.

makalelerinin yayımlanmasından neredeyse altmış yıl sonra, 2011 yılında, ABD'de Duke Üniversitesi Tıp Merkezi'nden bir grup, protonları totomerik konumda olduğu için hatalı eşleşmiş DNA bazlarının gerçekten de DNA polimerazın (yeni DNA'yı yapan enzim) aktif bölgesiyle uyumlu olduğunu, dolayısıyla yeni DNA kopyasının oluşumu sırasında ipliğin yapısına katılarak mutasyona neden olabileceğini göstermiştir.[5]

Yani protonları alternatif konumlarda olan totomerler görünüşe göre mutasyonun, dolayısıyla da evrimin yönlendiricilerinden biridir. Peki ama protonların yanlış konuma geçmesine ne sebep olur? Aşikâr "klasik" olasılık, etraflarında sürekli var olan moleküler titreşimlerin etkisiyle arada bir "sarsılmaları"dır.

Ancak bu, "sarsılma"ya yol açan itici gücü sağlayacak düzeyde bir termal enerji gerektirir. Üçüncü bölümde gördüğümüz, enzimlerin katalizlediği tepkimelerde olduğu gibi, protonun da hareketi gerçekleştirebilmek için dik bir enerji bariyerini aşması gerekir. Bir



Şekil 7.3: Şekilde totomerik (enol) formu T* ile gösterilen T, her zamanki tamamlayıcısı A yerine yanlışlıkla G ile eşleşebilir. Benzer şekilde A'nın totomerik formu (A*), T yerine yanlışlıkla C ile eşleşebilir. Eğer bu hatalar DNA replikasyonu sırasında gelişirse bir mutasyon ortaya çıkar.

başka alternatif ise protonların civardaki su molekülleriyle çarpışarak savrulması olabilir; ancak DNA'daki kodlayıcı protonların yakınında böyle bir savrulmaya yol açacak kadar çok su molekülü bulunmaz.

Ama bir yol daha var; enzimlerin elektron ve proton transfer şeklinde önemli rol oynadığı bulunmuş bir yol. Elektronlar ve protonlar gibi atomaltı parçacıkların dalga benzeri doğasının sonuçlarından biri de kuantum tünelleme yapma imkânıdır. Bir parçacığın konumundaki belirsizlik onun bir enerji engelinden *sızmasına* olanak tanır. Üçüncü bölümde, enzimlerin molekülleri tünellemenin gerçekleşebileceği kadar birbirine yaklaştırarak, elektronlarla protonların kuantum tünelleme yapmasından nasıl faydalandığını gördük. Watson ve Crick'in yeni ufuklar açan makalesinin yayımlanmasından on yıl sonra, bu bölümde daha önce karşılaştığımız İsveçli fizikçi Per-Olov Löwdin, kuantum tünellemenin, protonların hidrojen bağları üzerinde hareket ederek nükleotidlerin totomerik, mutajenik biçimlerini oluşturmasında alternatif bir yol olabileceğini ileri sürdü.

DNA mutasyonlarının, kimyasallar, morötesi ışık, radyoaktif bozunma sonucu açığa çıkan parçacıklar, hatta kozmik ışınlar gibi çok çeşitli mekanizmaların yol açtığı hasardan kaynaklandığını önemle vurgulamak gerek. Bu değişikliklerin hepsi moleküler düzeyde gerçekleşir, bu nedenle de kuantum mekaniği süreçleriyle ilgilidir. Ancak şimdilik elimizde kuantum mekaniğinin tuhaf özelliklerinin bu mutasyon kaynaklarında rol oynadığına dair bir bulgu yok. Fakat eğer kuantum tünellemenin DNA bazı totomerlerinin oluşumuyla ilgili olduğu gösterilirse, o zaman kuantum garipliği evrimi yönlendiren mutasyonlarda rol oynuyor olabilir.

Ancak DNA bazlarının totomerik biçimleri bütün doğal DNA bazlarının yaklaşık yüzde 0,01'i kadar olup hataya yol açma potansiyeli de aynı ölçektedir. Oysa bu oran, doğada karşılaştığımız milyarda bir civarındaki mutasyon hızından çok daha yüksektir;

dolayısıyla çift sarmalda totomerik biçimler gerçekten varsa, sonuçta ortaya çıkan hataların çoğu, DNA replikasyonunun yüksek sadakatini güvence altına alan çeşitli düzelti ("proofreading") işlemleriyle gideriliyor olmalıdır. Öyle bile olsa, kuantum tünelleme sonucu gelişen ve düzelti mekanizmasından kaçabilen hatalar, yeryüzündeki yaşamın evriminde itici güç oluşturan doğal mutasyonlar için bir kaynak olabilir.

Mutasyonun altında yatan mekanizmaları keşfetmek evrimi daha iyi anlamamızı sağlamakla kalmayıp, genetik hastalıkların nasıl ortaya çıktığına ya da hücrelerin nasıl kanserleştiğine dair de bir içgörü geliştirmemizi sağlayabilir, zira bu durumların her ikisi de mutasyonlardan kaynaklanır. Gelgelelim kuantum tünellemenin işin içine karışıp karışmadığını sınamakla ilgili sorun, mutasyonların kimyasal mutajenler ya da radyasyon gibi bilinen diğer nedenlerinden farklı olarak kuantum tünellemenin basitçe açılıp kapatılamamasıdır. O nedenle, arada fark olup olmadığını anlayabilmek için tünelleme varken ve yokken mutasyon hızlarını ölçmek kolay değildir.

Fakat mutasyonun kuantum mekaniğine dayalı kökenini saptamanın, klasik bilgi ile kuantum bilgi arasındaki farklılığa uzanan bir başka yolu olabilir. Klasik bilgi, mesaj değişmeksizin tekrar tekrar okunabilirken kuantum sistemler ölçümle her zaman bozulur. DNA polimeraz enzimi, kodlayıcı protonun konumunu belirlemek için DNA bazını tararken, laboratuvarda bir protonun konumunu ölçen fizikçiden ilkesel olarak farksız bir kuantum ölçüm gerçekleştirir. Her iki süreçte de ölçüm asla zararsız değildir: Kuantum mekaniğine göre, ister hücrenin içindeki DNA polimeraz enzimi tarafından gerçekleştirilsin, ister bir laboratuvarda Geiger sayacıyla, herhangi bir ölçüm, ölçülen parçacığın durumunu kaçınılmaz olarak değiştirir. Eğer o parçacığın durumu genetik şifredeki bir harfe karşılık geliyorsa, o zaman ölçümün, özellikle de sık yapılan ölçümün şifreyi değiştirmesi ve potansiyel olarak mutasyona neden olması beklenir. Peki buna ilişkin kanıt var mı?

DNA replikasyonu sırasında genomumuzun bütünü kopyalandığı halde, gen *okumalarının* çoğu DNA replikasyonu sırasında değil, genetik bilginin protein sentezini yönetmek için kullanıldığı süreçlerde gerçekleşir. Bu süreçlerden ilki olan *transkripsiyon* DNA tarafından kodlanan bilginin, DNA'nın kimyasal kuzeni olan RNA'ya kopyalanmasını içerir. RNA daha sonra protein yapımı için, *translasyon* denen ikinci sürecin gerçekleştiği protein sentez mekanizmasına gider. DNA replikasyonu sırasında gerçekleşen genetik bilgi kopyalanmasından ayırt etmek için, bu süreçleri DNA'nın *okunması* olarak adlandıracağız.

Bu sürecin kritik bir özelliği bazı genlerin diğerlerine göre daha sık okunmasıdır. DNA şifresinin transkripsiyon sırasında okunması bir kuantum ölçüm teşkil ediyorsa, o zaman daha sık okunan genlerin ölçümden kaynaklanan bozulmalara daha açık olması, dolayısıyla bu genlerde mutasyon hızının daha yüksek olması beklenir. Kimi çalışmalarda gerçekten de bu sonuca ulaşıldığı iddia edilmektedir. Örneğin; Atlanta Emory Üniversitesi'nden Abhijit Datta ve Sue Jinks-Robertson maya hücrelerindeki tek bir geni, hücrelerde az miktarda protein yapımı için sadece birkaç kez, çok miktarda protein yapımı içinse defalarca okunacak şekilde manipüle ettiler. Gendeki mutasyon hızının, yüksek okunma düzeylerinde otuz kat yüksek olduğunu buldular.[6] Fare hücrelerinde yapılan benzer bir çalışmada da aynı etki saptandı[7] ve insan genleriyle ilgili yeni bir çalışmada, en yüksek düzeyde okunan genlerimizin en fazla mutasyona uğrama eğiliminde olduğu sonucuna varıldı.[8] Bu bulgular en azından kuantum mekaniğinde ölçümün etkisiyle uyumludur ama elbette kuantum mekaniğinin sürece dahil olduğunu *ispatlamaz.* DNA'nın okunması, genlerin moleküler yapısını çeşitli yollardan bozarak ya da ona zarar vererek, kuantum mekaniğine başvurmaksızın mutasyonlara neden olabilecek biyokimyasal tepkimelerle ilişkilidir.

Bir biyolojik süreçte kuantum mekaniğinin rol oynayıp oynamadığını anlamak için, kuantum mekaniği olmaksızın bir anlam

ifade etmesi çok zor ya da imkânsız olan kanıtlar gerekir. İşin aslına bakarsanız, kuantum mekaniğinin biyolojide oynayabileceği role her ikimizin de ilgisini ilk olarak çeken şey böyle bir bilmeceydi.

Kuantum sıçraması yapan genler?

Eylül 1988'de *Nature*'da, Boston'daki Harvard Halk Sağlığı Fakültesi'nde çalışan tanınmış genetikçi John Cairns'in bakteri genetiğiyle ilgili bir makalesi yayımlandı.[9] Makale, görünüşe göre neo-Darwinist evrim kuramının temel öğretisiyle, genetik varyasyonun kaynağı olan mutasyonların rastgele geliştiği ve evrimin yönlendiricisinin doğal seçilim, yani "en iyi uyum sağlayanın hayatta kalması" olduğu ilkesiyle çelişiyordu.

Oxford'da eğitim görmüş İngiliz bir hekim ve bilim insanı olan Cairns 1961 yılında, New York eyaletindeki dünyaca ünlü Cold Spring Harbor Laboratuvarı'nda bir yıllık ziyaretine başlamadan önce Avustralya ve Uganda'da çalışmıştı. 1963-1968 yıllarında yöneticisi olduğu bu laboratuvar özellikle de Salvador Luria, Max Delbrück ve James Watson gibi bilim insanlarının çalıştığı 1960'lı ve 70'li yıllarda, o dönemde yeni palazlanmakta olan moleküler biyoloji biliminin yuvasıydı. Cairns aslında geleceğin Nobel ödülü sahibi derbeder Watson ile yıllar önce Oxford'daki bir toplantıda konudan konuya atlayarak yaptığı sunum sırasında tanışmış ve ondan pek de etkilenmemişti. Aslında Cairns'in bilimin ölümsüz simalarından biri olan Watson'la ilgili genel izlenimi şöyleydi: "Kafadan çatlak olduğunu düşünmüştüm."[10]

Cairns, Cold Spring Harbor'da birkaç çok önemli çalışmaya imza attı. Örneğin; DNA replikasyonunun nasıl tek bir noktada başlayıp, ray üzerinde ilerleyen tren misali kromozom boyunca ilerlediğini gösterdi. Sonunda James Watson'a da kanı kaynamış olsa gerek ki, 1966'da bakteri virüslerinin moleküler biyolojinin gelişmesinde oynadığı rolle ilgili bir kitabın editörlüğünü birlikte üstlendiler. Derken Cairns 1990'lı yıllarda, Luria ile Delbrück'ün,

göründüğü kadarıyla mutasyonların organizmanın çevresel soruna maruz kalmasından önce rastgele ortaya çıktığını kanıtlayan Nobel Ödüllü çalışmasıyla ilgilenmeye başladı. Cairns, Luria ile Delbrück'ün, bir virüse karşı dirençli olan mutant bakterilerin, virüse maruz kalmaya cevaben ortaya çıkmayıp, toplulukta önceden beri var olduğunu kanıtladığı düşünülen deneyinin tasarımında bir zaaf olduğunu düşünüyordu.

Cairns, virüse karşı hâlihazırda dirençli olmayan herhangi bir bakterinin, soruna yanıt olarak uyum sağlamak amacıyla yeni mutasyonlar geliştirmeye zamanı olmayacağına, zira virüs nedeniyle hepsinin zaten çabucak öleceğine dikkat çekti. Bakteriye, soruna yanıt olarak mutasyon gelişme açısından daha fazla şans tanıyan başka bir deney tasarladı. Ölümcül bir virüse karşı direnç sağlayan mutasyonlar yerine, hücreleri açlığa mahkûm etti ve bakterilerin hayatta kalıp çoğalmasını sağlayan mutasyonlar gelişip gelişmediğine baktı. Luria ve Delbrück gibi o da toplulukta birkaç mutantın doğrudan çoğalabildiğini gördü ki bu, o mutantların toplulukta önceden de var olduğunu gösteriyordu. Ancak Cairns önceki çalışmanın aksine daha sonra, besbelli ki açlığa *cevaben* çok sayıda başka mutantın da ortaya çıktığını gözlemledi.

Cairns'in elde ettiği sonuçlar, mutasyonların rastgele ortaya çıktığı ilkesiyle ters düşüyordu; görünüşe göre yaptığı deneyler, mutasyonların bir avantaj sağlamaları durumunda ortaya çıkma eğiliminde olduğunu gösteriyordu. Bu bulgular Lamarck'ın gözden düşmüş evrim kuramını destekler görünüyordu. Aç kalan bakterilerin boynu uzamıyordu ama göründüğü kadarıyla onlar da Lamarck'ın farazi antilobu gibi çevreden gelen bir meydan okumaya kalıtsal değişimler, yani mutasyonlarla tepki veriyordu.

Cairns'in deneysel bulguları kısa sürede başka bilim insanları tarafından doğrulandı. Yine de söz konusu fenomen, o zamanki genetik ve moleküler biyolojiyle açıklanamıyordu. Bilindiği kadarıyla bir bakterinin, hatta herhangi bir canlının hangi genlerin ne zaman mutasyona uğrayacağını *seçme* şansı yoktu. Bulgular ayrıca

moleküler biyolojide santral dogma olarak adlandırılan ilkeyle de çelişiyordu. Santral dogmaya göre, bilgi akışı transkripsiyon sırasında sadece ve sadece DNA'dan proteinlere ve hücrenin ya da organizmanın dış ortamına doğru tek yönlü gerçekleşebilirdi. Ama Cairns'in sonuçları doğruysa eğer, o zaman hücreler bu genetik bilgi akışını tersine çevirebiliyor ve ortamın, DNA'da yazılı olanları etkilemesini sağlayabiliyordu.

Cairns'in makalesinin yayımlanması bir tartışma fırtınası kopardı ve *Nature*'a bulgulardan anlam çıkarmaya çalışan bir yığın mektup yağdı. "Adaptif mutasyon" olarak adlandırılan fenomen bir bakteri genetikçisi olan Johnjoe'yu da derin bir kafa karışıklığı içerisinde bırakmıştı. O sıralar, kuantum mekanikçisi John Gribbin'in popüler kitabı *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*'yi[11] (*In Search of Schrödinger's Cat*) okuyan Johnjoe, kuantum mekaniğinin, özellikle de bir muamma olan kuantum ölçümün, Cairns'in sonuçları için bir açıklama sağlayıp sağlayamayacağını aklından çıkaramıyordu. Johnjoe, Löwdin'in genetik şifrenin kuantum harflerle yazıldığı iddiasına da aşinaydı. Dolayısıyla Löwdin haklıysa, Cairns'in bakterilerini bir kuantum sistem olarak düşünmek gerekirdi. Ve bu doğruysa eğer, o zaman bir mutasyonun olup olmadığını araştırmak da kuantum ölçüm yapmak anlamına gelirdi. Kuantum ölçümün bozucu etkisi Cairns'in elde ettiği garip sonuçların açıklaması olabilir miydi? Bu olasılığı incelemek için Cairns'in deney tasarımına daha yakından bakmamız gerek.

Cairns bir bağırsak bakterisi olan *E. coli*'den* milyonlarcasını, besin olarak sadece laktoz içeren besiyerlerindeki jelin yüzeyine ekti. Cairns'in kullandığı *E. coli* suşunun genlerinden birinde laktozu yemesini engelleyen bir hata olduğu için bakteriler açlığa mahkûm olmuştu. Ama ölmediler, jelin yüzeyinde bekleştiler. Cairns'i şaşırtan ve onca tartışma koparan, bakterilerin uzun süre o vaziyette kalmamış olmasıydı. Günler sonra Cairns jelin yüzeyinde

* *Escherichia coli.*

koloniler belirdiğini gördü. Her koloni, bir mutasyonun kusurlu laktoz yeme geninin DNA şifresindeki hatayı düzelttiği tek bir hücreden köken alan mutantlardan oluşuyordu. Mutant koloniler günlerce, ta ki besiyerleri tükenene kadar belirmeye devam etti.

Luria-Delbrück deneyinin örnek teşkil ettiği standart evrim kuramına göre, *E. coli* hücresinin evrimi toplulukta önceden mutantların olmasını gerektiriyordu. Deney sırasında gerçekten de böyle birkaç mutant kendini belli etti ama bunların sayısı, bakteriler (mutasyonların hücrelerde adaptif bir avantaj sağlayabileceği ve bu yüzden de "adaptif mutasyonlar" olarak adlandırılabileceği) laktozlu ortama ekildikten günler *sonra* hızla beliren laktoz-yiyici kolonilerin varlığını açıklayamayacak kadar azdı.

Cairns bu fenomenle ilgili, mutasyon hızında genel artış gibi önemsiz açıklamaların geçersiz olduğunu kanıtladı. Ayrıca adaptif mutasyonların sadece, mutasyonun bir avantaj sağladığı koşullarda ortaya çıktığını gösterdi. Yine de sonuçları klasik moleküler biyolojiyle açıklanamıyordu; klasik bilgiye göre ortamda laktoz olsun olmasın mutasyonların aynı hızla ortaya çıkması gerekirdi. Ancak Löwdin'in savunduğu gibi genler aslında kuantum bilgi sistemleriyse, o zaman ortamda laktoz bulunması, hücre DNA'sında mutasyon olup olmadığını açığa çıkaracağı için potansiyel açıdan bir kuantum ölçüm –tekil protonların konumlarına bağımlı, kuantum düzeyinde bir olay– teşkil edecekti. Kuantum ölçüm, Cairns'in mutasyon hızları arasında gözlemlediği farkı açıklayabilir miydi?

Johnjoe görüşlerini Surrey Üniversitesi Fizik Bölümü'nde tartışmaya açtı. Dinleyiciler arasında Jim de vardı ve anlatılanlar, bütün şüphelerine rağmen onda merak uyandırmıştı. Bunun üzerine, bu fikrin bir kuantum bacağı olup olmadığını araştırmak için birlikte çalışmaya karar verdik ve sonunda, adaptif mutasyonlara açıklama getirebilecek "kabataslak"* bir model öne sürdük, çalışmamız 1999'da *Biosystems*'ta yayımlandı.[12]

* Bu ifadeyle kast ettiğimiz, modelin kesin bir matematiksel çatısının olmadığıydı.

Model protonların kuantum mekaniğine göre davrandığı kabulüyle başlar; dolayısıyla açlık çeken *E. coli* hücrelerinin DNA'sındaki protonlar arada bir totomerik (mutajenik) pozisyona tünelleme yapacak ve yine aynı şekilde tünellemeyle başlangıç konumuna kolayca geri dönebilecektir. Kuantum mekaniği açısından sistem, protonun her iki tarafa da yayılmış ama asimetrik (yani protonu mutant olmayan konumda bulma ihtimalinin çok daha yüksek olduğu) bir dalga fonksiyonu şeklinde tanımlandığı, tünelleme olan ve olmayan iki durumun süperpozisyonu olarak düşünülmelidir. Burada protonun nerede olduğunu kaydedecek deneysel ölçüm cihazı ya da aleti yoksa da ölçüm işlemi dördüncü bölümde gördüğümüz gibi ortam tarafından gerçekleştirilir. Dolayısıyla ölçüm her an vardır. Örneğin; DNA'nın protein sentez mekanizması tarafından okunması, protonu bağın hangi tarafında –normal konumda (büyüme yok) ya da totomerik konumda (büyüme var)– bulunacağına "karar vermeye" zorlar ve proton çoğunlukla normal konumda bulunur.

Cairns'in *E. coli* hücrelerini bir kutu dolusu bozuk para olarak düşünelim; her bir bozuk para, laktoz kullanım geninin kilit nükleotid bazındaki protonu temsil etsin.* Bu proton için iki durumdan biri söz konusu olabilir: totomerik olmayan, normal konuma karşılık gelen "tura" ve nadir görülen totomerik konuma karşılık gelen "yazı". Başlangıçta bütün paralar tura konumunda, yani proton totomerik olmayan konumda bulunuyor olsun. Ancak kuantum mekaniğine göre proton her zaman normal ve totomerik konumların süperpozisyonu halinde bulunacaktır; bu nedenle farazi kuantum paralarımız, olasılık dalgasının çoğunlukla normal tura konumu lehine olacağı bir süperpozisyon (yazı ve turaların süperpozisyonu) halinde bulunacaktır. Ancak protonun konumu eninde sonunda içinde bulunduğu ortam tarafından ölçülecek ve proton nerede bulunacağını *seçmek* zorunda kalacaktır; bunu, tura gelme ihtimalinin çok yüksek olduğu bir yazı-tura atma işlemine benzetebiliriz. DNA

* Gerçekte baz çiftini bir arada tutan bağ sayısı birden fazladır; buna karşılık tabloyu basitleştirmek için tek bağ örneği üzerinden gittiğimizde de argümanımızda değişen bir şey olmaz.

arada bir kopyalanıyor olsa da* oluşan yeni iplik sadece orada var olan bilgiyi, yani hemen her zaman kusurlu enzimi kodlayacağı için hücre aç kalmaya devam edecektir.

Ama bozuk paranın bir kuantum parçacığını temsil ettiğini unutmayın; dolayısıyla ölçümden sonra bile özgün kuantum süperpozisyonu yeniden kazanmak üzere kuantum dünyasına geri dönmesi mümkün. Bu nedenle yazı-tura attıktan ve tura geldikten sonra bozuk paramızla yeniden ve yeniden ve yeniden yazı-tura atılacak ve eninde sonunda yazı gelecektir. Bu durumda DNA yine kopyalanabilir ama şimdi aktif enzim yapılacaktır. Laktoz yokluğunda bu herhangi bir fark yaratmaz çünkü laktoz olmadığında gen işe yaramaz. Hücre aç kalmaya devam eder.

Hâlbuki ortamda laktoz varsa durum çok farklı seyreder çünkü düzeltilmiş gen hücrenin laktoz tüketmesine, büyüyüp çoğalmasına olanak tanır. Bundan sonrasında kuantum süperpozisyona geri dönmek mümkün değildir. Sistem artık mutant bir hücre olarak klasik dünyada geri dönüşsüz biçimde kıstırılmıştır. Bunu –sadece ortamda laktoz varken– kutudan alıp havaya attığımızda yazı gelen paraları, üzerinde "mutantlar" yazan bir başka kutuya koymaya benzetebiliriz. Baştaki kutuya döndüğümüzde geride kalan paralarla (yani *E. coli* hücreleri) yazı-tura atılmaya devam edecek, her yazı geldiğinde para o kutudan alınıp mutant kutusuna aktarılacaktır. Bu durumda mutant kutusunda giderek daha fazla bozuk para birikir. Bunun deneydeki karşılığı, laktoz kullanarak yaşayabilen yeni mutantların, tam da Cairns'in bulduğu gibi, deney ortamında sürekli belirmesidir.

1999'da yayımladığımız model pek fazla kişinin aklını çelmedi. Johnjoe hiç oralı olmadı ve üstüne bir de kuantum mekaniğinin biyoloji ve evrimde daha da büyük bir rol üstlendiğini iddia ettiği kitabı *Quantum Evolution*'ı[13] [*Kuantum Evrimi*] yazdı. Ama

* Aç ve stres altındaki hücreler DNA'larını kopyalama çabasını sürdürse bile kaynaklar sınırlı olduğu için replikasyon büyük olasılıkla durur ve sadece birkaç gene karşılık gelen kısa bölümler yapılır.

bu, proton tünellemenin enzimlerde rol oynadığının yaygın olarak kabul edilmesinden önceydi ve fotosentezde kuantum uyumu henüz keşfedilmemişti; o nedenle bilim insanları haklı olarak tuhaf kuantum fenomenlerinin mutasyonla ilişkisi konusunda şüpheci davranıyordu ve doğrusu, biz de pek çok meseleyi atlamıştık.[14] Ayrıca adaptif mutasyonlar fenomeni de *karman çorman* olmuştu. Cairns'in deneyindeki *E. coli* hücrelerinin, ölmüş ve ölmek üzere olan hücrelerden gelen eser elementlerle idare ettiği ve arada bir replike olduğu, hatta DNA değiş tokuşu yaptığı anlaşılmıştı. Adaptif mutasyonlarla ilgili olarak, artan mutasyon oranlarını farklı süreçlerin (bütün genlerdeki mutasyon oranında genel artış; hücre ölümü ve ölü hücrelerin mutant DNA'sının açığa çıkması; son olarak da mutant laktoz geninin canlı hücreler tarafından ortamdan alınıp genomla birleştirilerek çoğaltılması) bileşimiyle izah etmeye çalışan konvansiyonel açıklamalar boy göstermeye başlamıştı.[15]

Bu "konvansiyonel" açıklamaların adaptif mutasyonları bütünüyle izah edip etmediği hâlâ belirsizdir. Cairns'in makalesinin yayımlanmasının üzerinden yirmi beş yıl geçmesine rağmen fenomen hâlâ kafa karıştırmaktadır; bunun en açık kanıtı mekanizmayı sadece *E. coli*'de değil, başka mikroorganizmalarda da araştıran makalelerin yayımlanmaya devam etmesidir.[16] Mevcut duruma göre kuantum tünellemenin, adaptif mutasyonlarla ilişkili olabileceği ihtimalini dışlamamakla birlikte tek açıklama olduğunu da şu anda iddia edemiyoruz.

Kuantum mekaniğini adaptif mutasyonlara karıştırmaya dair güçlü bir gereksinim olmadığı için bir adım geri çekilip, daha temel bir sorunun yanıtını, kuantum tünellemenin mutasyonlarda hiç rol oynayıp oynamadığını araştırmaya karar verdik. Hatırlarsanız, kuantum tünellemenin mutasyonlarla ilişkili olabileceği meselesi ilk olarak Löwdin tarafından kuramsal zeminde ortaya atılmış ve o zamandan bu yana gerek kuramsal çalışmalar[17] gerekse DNA'daki bazlarla aynı eşleşme özelliklerini gösterecek şekilde tasarlanmış ama deneyler için daha uygun kimyasallar olan "model

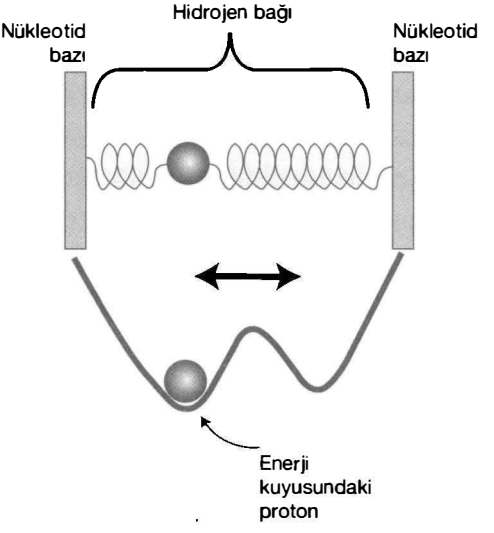
baz çiftleri" ile yapılan deneysel çalışmalar tarafından desteklenmiştir. Ancak şimdiye kadar proton tünellemenin mutasyona neden olduğu ispatlanamamıştır. Sorun şu ki, proton tünellemenin rekabet ettiği diğer mutasyon nedenleri ve onarım mekanizmaları, mutasyonlarda bir rolü varsa bile, bu rolün aydınlatılmasını daha da zorlaştırmaktadır.

Johnjoe bu meseleyi araştırmak için üçüncü bölümde anlattığımız enzim deneylerindeki fikirlerden yararlandı. Hatırlarsanız, proton tünelleme "kinetik izotop etkileri" keşfedildikten sonra anlam kazanmıştı. Eğer kuantum tünelleme enzimatik bir tepkimeyi hızlandırmada rol oynuyorsa, o zaman (tek bir protondan oluşan) hidrojen çekirdeğini (bir proton ve bir nötrondan oluşan) döteryum çekirdeği ile değiştirmek tepkimeyi yavaşlatacaktır çünkü kuantum tünelleme, tünelleme yapmaya çalışan parçacığın kütlesinin iki katına çıkmasına karşı son derece hassastır. Johnjoe mutasyon için benzer bir yaklaşım deneyerek, döteryumlu suda (D_2O) mutasyon hızlarının normal sudakinden (H_2O) farklı olup olmadığını araştırıyor. Şimdilik görünen o ki, hidrojen yerine döteryumun geçmesi mutasyon hızını gerçekten de değiştirmekte ama bu etkinin hakikaten kuantum tünellemeden kaynaklandığına emin olabilmek için çok daha fazla çalışma yapılması gerekiyor; zira hidrojen yerine döteryumun geçmesi, kuantum mekaniğiyle ilgili herhangi bir açıklamaya ihtiyaç duymaksızın pek çok başka biyomoleküler süreci etkileyebilir.

Jim DNA çift sarmalındaki protonlarda kuantum tünellemenin kuramsal açıdan mümkün olup olmadığını araştırmaya odaklanmış durumda. Bir kuramsal fizikçi bu denli karmaşık bir sorunu kurcalarken, sistemin ya da sürecin en önemli olduğu düşünülen özelliklerini koruyarak, matematiksel olarak işlenebilir, basitleştirilmiş bir model oluşturmaya çalışır. Bu tür modellerin incelikleri ve karmaşıklık düzeyi, gerçeğini mümkün olduğunca taklit edebilmesi için sonra detaylar eklenerek gitgide artırılabilir.

Bu durumda matematiksel analiz için başlangıç noktası olarak seçilen model, duvarlara tutturulmuş ve iki taraftan bağlı olduğu iki yay tarafından zıt yönlere çekilerek yerinde tutulan bir topla (protonu temsil eden) resmedilebilir (şekil 7.4). Top, her iki yayın çekme kuvvetinin eşit olduğu konumda kalma eğilimi gösterir; dolayısıyla yaylardan biri daha az esnekse (daha az uzuyorsa), top bu daha az esnek yayın bağlı olduğu duvara daha yakın duracaktır. Yine de bu yayın bir miktar daha "esneme payı" olacağı için topun, diğer duvara daha yakın ve daha kararsız bir konumda durması da mümkündür. Bu durum, kuantum fiziğinde *çift kuyu potansiyeli* adını verdiğimiz duruma karşılık gelir ve DNA ipliğindeki kodlayıcı protonun durumunu yansıtır; şeklin sol tarafındaki kuyu protonun normal konumuna, sağ taraftakiyse daha nadir görülen totomerik konuma denk düşer. Klasik bakış açısıyla, proton her ne kadar çoğunlukla sol taraftaki kuyuda bulunursa da, bir dış kaynaktan yeterli enerji alırsa ara sıra diğer (totomerik) tarafa geçebilir. Ama ne olursa olsun iki kuyudan birinde bulunacaktır. Oysa kuantum mekaniği, protonun tepeye tırmanmak için yeterli enerjisi olmasa bile enerji engelinden kendiliğinden tünelleme yapmasına olanak tanır, yani bir enerji itişi gerekmez. Bu kadarla da kalmaz, proton dolayısıyla iki konumda (sol ve sağ taraftaki kuyular) aynı anda süperpozisyon halinde bulunabilir.

Bu durumu resimle tasvir etmek, tabii ki matematiksel bir modelle net olarak ifade etmekten çok daha kolay. Protonun davranışını anlayabilmek için bu potansiyel kuyusunun ya da enerji yüzeyinin şeklini çok doğru ve detaylı biçimde saptamak gerekir. Bu öyle eften püften bir mesele değildir çünkü kesin biçim pek çok değişkene bağlıdır. Hidrojen bağı tipik olarak yüzlerce, hatta binlerce atomdan oluşan büyük ve karmaşık bir DNA yapısının parçası olmakla kalmaz, aynı zamanda hücrede su molekülleri ve başka kimyasallar içeren ılık bir banyonun içinde bulunur. Dahası moleküler titreşimler, ısı dalgalanmaları, enzimlerin başlattığı tepkimeler,



Şekil 7.4: İki DNA bazı bölgesini birbirine bağlayan bir hidrojen bağındaki protonun, bir o yana bir bu yana salınım yapacak şekilde iki yay üzerinde olduğu düşünülebilir. Burada çift enerji kuyusu olarak modellenmiş olası iki kararlı konumu vardır. Soldaki kuyu (mutasyonsuz konuma karşılık gelir), sağdaki kuyudan (totomerik konum) biraz daha derin olduğu için proton soldakinde bulunmayı tercih eder.

hatta morötesi ışınlar veya iyonlaştırıcı radyasyon DNA bağının davranışını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyebilir.

Jim'in doktora öğrencisi Adam Godbeer'in bu düzeyde bir karmaşıklığı ele almak için uyguladığı yöntem, günümüzde fizikçiler ve kimyagerler arasında popüler olup karmaşık yapıları modellemek amacıyla kullanılan *yoğunluk fonksiyonel teorisi* (YFT) adlı güçlü bir matematiksel yaklaşım içerir. Bu yöntem, hidrojen bağının enerji kuyusunun şeklini, DNA baz çiftiyle ilgili olabildiğince fazla yapısal bilgiyi dikkate alarak, bilgisayarla son derece doğru biçimde hesaplamaya olanak tanır. YFT'nin yaptığı işi, etraftaki DNA atomlarından kaynaklanan çekme, itme ve sallama nedeniyle hidrojen bağına etki eden bütün kuvvetlerin bir haritasını çıkarmak olarak düşünün. Bu bilgi daha sonra proton tünellemenin zaman içindeki davranışını hesaplamak için kullanılır. Etrafta bulunan DNA atomları ve su moleküllerinin protonun davranışını ve bir DNA ipliğinden diğerine kuantum tünelleme yapabilmesini sürekli etkilemesi, sorunlara bir yenisini ekler. Fakat dış ortamın daimi etkisi de kuantum mekaniği denklemlerine dahil edilebilir.

Bu kitabı yazdığımız 2014 yazında, Godbeer'in hesaplamaları,[18] iki protonun karşıdan karşıya A–T bağındaki totomerik konumlarına tünelleme yapmasının mümkün ama çok düşük ihtimalli olduğunu düşündürmektedir; bununla birlikte daha fazla sayısal modelleme çalışmasının yapılması gerekmektedir. Ancak kuramsal modeller, hücre içinde bulunan ortamın tünelleme sürecine engel değil de aktif olarak destek olduğunu göstermektedir.

O halde kuantum mekaniğiyle genetik arasındaki bağlantı konusunda şimdilik nasıl bir tahmin yürütebiliriz? Genetik şifremiz kuantum parçacıklarıyla yazıldığı için kuantum mekaniğinin kalıtımın temelinde yattığını gördük. Schrödinger'in de öngördüğü gibi kuantum genler, gelmiş geçmiş her mikroorganizmanın, bitki ve hayvanın klasik yapısını ve işlevini şifreler. Kazara olmamıştır bu, ilgisiz de değildir çünkü genler klasik yapılar olsaydı eğer, aslına sadık kalarak kopyalanmaları mümkün olmazdı; genler kuantum kurallarından azade olamayacak kadar küçüktür. Genlerin kuantum doğası Vostok'taki mikroorganizmaların genomlarını binlerce yıl boyunca aslına sadık kalarak kopyalamasını sağlamıştır, tıpkı atalarımızın genlerini gezegenimizde yaşamın başlangıcına dek geri giden milyonlarca, hatta milyarlarca yıllık bir süreç boyunca kopyalamasını sağladığı gibi. Yaşam, milyarlarca yıl önce kuantum diyarında bilgi kodlama hilesini "keşfetmeseydi", yeryüzünde var olmayı ve evrilmeyi başaramazdı.* Öte yandan kuantum mekaniğinin genetik mutasyonlarda –evrim için yaşamsal önem taşıyan, genetik bilginin kopyalanmasındaki o *sadakatsizlik*– önemli ve doğrudan bir rol oynayıp oynamadığını daha göreceğiz.

* Bu, günümüzde kuantum biyolojisi alanındaki en ateşli tartışma konularından biridir: Yaşam kuantum avantajlarını *keşfetmiş* midir, yoksa kuantum mekaniği sadece pasif bir eşlikçi midir?

8
Zihin

Jean-Marie Chauvet, Fransa'nın Auvergne bölgesinde doğdu ama ailesi o beş yaşındayken ülkenin güneydoğusunda nehirleri, koyakları ve kalkerli kaya zeminde açılmış kanyonlarıyla görkemli bir bölge olan Ardèche'e taşındı. Jean-Marie on iki yaşındayken arkadaşlarıyla birlikte, İkinci Dünya Savaşı sırasında verilen kaskları takıp nehir boyunca uzanan Ardèche vadisinin duvarlarındaki irili ufaklı mağaralara keşif gezileri yapmaya başlayınca hayatının tutkusunu da keşfetti. On dört yaşında okulu bırakan Jean-Marie önce taş ustası olarak, daha sonra bir hırdavatçıda çalıştı, sonra da bakıcılık yaptı. Norbert Casteret'nin kitabı *My Life Underground*'dan [*Yerin Altındaki Hayatım*] aldığı ilhamla hafta sonlarını elinden geldiğince çocukluk tutkusuna ayırıyor, sarp kayalara tırmanıyor, günün birinde keşfedilmemiş bir mağaranın gizli hazinesini bulacak ilk insan olma hayaliyle karanlık mağaraların derinlerine dalıyordu. "Bize yol gösteren, her zaman bilinmeyendir. Bir mağarada yürürken ne bulacağınızı bilmezsiniz. Bir sonraki köşeyi dönünce mağaranın sonuna mı geleceksiniz, yoksa muhteşem bir şeyle mi karşılaşacaksınız?"[1]

18 Aralık 1994 Cumartesi günü, yeni bir şeyler bulma umuduyla kayalıklar arasındaki koyaklarda dolaşan 42 yaşındaki Jean-Marie ile mağaralara meraklı iki arkadaşı Eliette Brunel-Deschamps ve Christian Hillaire için sıradan bir hafta sonu gibi başlamıştı. Öğleden sonra hava serinleyince, o saatlerde güneş aldığı için soğuk kış

gününde vadinin korunaklı yerlerine göre nispeten ılık olan Cirque d'Estre denen bölgeye gitmeye karar verdiler. Üç arkadaş, Pont d'Arc'ın muhteşem manzarasını gören koyağın girişinden her dem yeşil pırnal meşeleri, şimşir ve süpürgeotlarıyla kaplı sekiler arasında kıvrıla kıvrıla giden eski bir patikayı takip ettiler. Çalıların içinde yol bulmaya çalışırken, kayaların arasında genişliği yaklaşık 25 cm, yüksekliğiyse 75 cm civarında olan küçük bir delik dikkatlerini çekti.

Bu delik, mağaracılar için kelimenin tam anlamıyla açık davet demekti; nitekim onlar da zorlukla sığabildikleri delikten içeri girdiler ve kendilerini ancak ayakta durabilecekleri yükseklikte ve sadece birkaç metre uzunluğunda küçük bir odacığın içinde buldular. Odacığın arka tarafından gelen belli belirsiz hava akımını hemen fark ettiler. Mağaralara girip çıkmışlığı olanlar, ilk bakışta fark edilmeyen bir tünelden gelen ılık hava akımına aşinadır. Deneyimli mağaracılar en gizli geçitleri iyi bilirler; bunlar fenerinizden yayılan ince ışık huzmesinin dışında kalır. Ama bu küçücük odadaki hava akımı bilinen bir mağaradan gelmiyordu. Ekip odacığın sonundaki taşları teker teker kaldırmaya başladı ve sonunda havanın kaynağına, aşağı doğru inen düşey hava bacasına ulaştılar. İçinde emekleyebileceği karanlık ve dar bacaya iple ilk indirdikleri kişi, ekibin en ufak tefek elemanı Eliette oldu. Baca önce aşağı iniyor, sonra tekrar geri dönüp yukarı çıkarak dışarı açılıyordu ve bu noktada Eliette bir kil zeminin 10 metre yukarısında durduğunu görebiliyordu. Fenerinin ışığı uzaktaki duvarı aydınlatamayacak kadar zayıftı ama Eliette karanlıkta yankılanan sesinden büyük bir mağarada olduğunu anlamıştı.

Ekip büyük bir heyecana kapılmıştı ama kayalığın aşağısına park ettikleri kamyonete gidip ip merdiveni almak zorundaydılar. Oyuğa geri döner dönmez merdiveni sarkıttılar; mağaranın zeminine ilk ayak basan Jean-Marie oldu. Muhteşem beyaz kalsit sütunların bulunduğu gerçekten de büyük bir mağaraydı, yüksekliği en az 50 metre vardı, genişliği de buna yakındı. Üçlü, bu el değmemiş ortama zarar vermemek için birbirinin ayak izlerine basarak,

akmataşları ve sedefli perde oluşumların, kadim zamanlarda ayıların kış uykusuna yatmak için kil zeminde kazdığı yuvalara dağılmış kemiklerle dişlerin arasından geçerek karanlığın içinde dikkatle ilerlemeye başladı.

Elindeki fenerin ışığı mağaranın duvarını aydınlatınca Eliette bir çığlık kopardı. Kırmızı toprak boyasıyla çizilmiş küçük bir mamut resmi görmüştü. Nutku tutulan üç arkadaş duvar boyunca ilerledikçe ayı, aslan, av kuşları, bir başka mamut, hatta bir gergedana ait figürler ve insan eli izi gördü fener ışığında. O ânı şöyle anımsıyor Chauvet: "Kendi kendime 'Bu bir düş olmalı. Bu bir düş olmalı' diye tekrarlayıp duruyordum."[2]

Fenerlerin pili bitmek üzereydi; geldikleri yoldan dönüp mağaradan çıktılar ve Eliette'in kızı Carole ile akşam yemeği yemek için eve döndüler. Fakat gördüklerine dair coşkuyla anlattıkları kopuk kopuk, ipe sapa gelmez şeyler Carole'ün o kadar ilgisini çekti ki bahsettikleri mucizeyi kendi gözleriyle görebilmesi için onu hemen mağaraya götürmelerinde ısrar etti.

Mağaraya tekrar girdiklerinde hava kararmıştı. Bu kez yanlarına aldıkları daha güçlü fenerler keşiflerinin ihtişamını bütünüyle gözler önüne seriyordu: Mağara duvarları atlar, ördekler, bir baykuş, aslanlar, sırtlanlar, panterler, geyikler, mamutlar, dağ keçileri ve bizon resimlerinden oluşan muhteşem bir koleksiyonla bezeliydi. Bunların çoğu kömürle gölgelendirilmiş, üst üste çizilmiş başların bir perspektif algısı yarattığı, duygusal çekiciliği olan pozlarda, olağanüstü doğal bir üslupla çizilmiş resimlerdi. Sakin ve dalgın görünümlü bir sıra at, büyük yuvarlak ayaklı bir mamut yavrusu ve karşı karşıya gelmiş bir çift gergedan resmi vardı. Hatta yedi bacaklı çizilmiş bir gergedan koşuyormuş görüntüsü veriyordu.

Şimdiki adıyla Chauvet mağarası, günümüzde tarihöncesi sanatın en önemli örneklerinden biri sayılmaktadır. El değmemiş bir yer olduğundan (tarihöncesi dönemde yaşamış sakinlerinin ayak izleri bile olduğu gibi durmaktadır), narin ortamın korunması için dışarıdan ziyarete kapalıdır. İçeriye giriş sıkı biçimde denetlenmektedir

ve şimdiye kadar sadece şanslı birkaç kişiye giriş izni verilmiştir. Onlardan biri de, pek çoğumuzun, bu mağaralarda otuz bin yıl önce ikamet etmiş buz devri avcılarının çarpıcı kaya sanatına en fazla yaklaşabileceği 2011 yapımı *Cave of Forgotten Dreams* [*Unutulmuş Düşler Mağarası*] adlı filmi çeken Alman yönetmen Werner Herzog'dur.

Bu bölümde incelemek istediğimiz konu kaya resimlerinin kendisi değil, ifadesini muhtemelen en iyi Herzog'un filmine verdiği isimde bulan bilmece. Resimlere bakar bakmaz bunların, gözün gördüklerinin basit, düz bir temsili olmadığı anlaşılır. Bu resimler hayvanlar hareket ediyormuş izlenimini uyandırmak için soyutlamayla çizilmiş, temsilî hayvanların neredeyse üç boyutlu görüntüsünü oluşturmak için kayaların kıvrımlarından ve kavislerinden faydalanılmıştır.* Bu ressam(lar) sadece varlıkları değil, fikirleri resmetmiştir. Chauvet mağarasının duvarlarına o pigmentleri süren insanlar da, tıpkı bizim gibi dünya ve insanın dünyadaki yeri hakkında düşünen kişilerdi; bilinçliydiler.

Peki ama bilinç ne demek? Bu soru muhtemelen bir bilinç *kazandığımızdan* bu yana filozofların, sanatçıların, nörobiyologların, hatta hepimizin kafasını muhakkak kurcalamıştır. Bu bölümde herhangi bir kesin tanım getirme çabasından uzak durarak kendi kuyumuzu kazacağız. Aslına bakarsanız biyolojik fenomenlerin bu en tuhafını anlama arayışının, birçok zaman genellikle onu kılı kırk yararak tanımlamaya çalışarak aksatıldığını düşünüyoruz. Biyologlar yaşamın tanımı konusunda bile uzlaşamazken bu onları hücreyi, çift sarmalı, fotosentezi, enzimleri ve birçoğuna kuantum mekaniğinin hükmettiği başka yaşam fenomenlerini aydınlatmaktan alıkoymamıştır ve bütün bunlar canlı olmanın anlamı hakkında çok şey açığa çıkarmıştır.

Bu açığa çıkarılanların birçoğunu önceki bölümlerde inceledik; ancak manyetik pusulalardan enzim etkisine, fotosentezden kalıtım

* Sinemaseverler için şok edici olsa da Herzog'un filmi üç boyutludur.

ve koku duyusuna kadar şimdiye kadar tartıştıklarımızın çoğu konvansiyonel kimya ve fizik kapsamında incelenebilir. Kuantum mekaniği –özellikle birçok biyoloğun bakış açısından– alışılmadık gelse de, modern bilimin çerçevesine tastamam oturur. Çift yarık deneyinde ya da kuantum dolanıklığında olan biteni sezgilerimiz ya da sağduyumuzla kavrayamasak bile, kuantum mekaniğinin dayandığı matematik kesin, mantıklı ve inanılmaz derecede güçlüdür.

Ama bilinç bundan farklıdır. Bilinci şimdiye kadar tartıştığımız türden bir bilimde nereye, nasıl oturtulabileceğimizi kimse bilmiyor. "Bilinç" terimini içeren (muteber) matematiksel denklemler olmaması bir yana, mesela kataliz ya da enerji aktarımından farklı olarak bilinç bugüne kadar cansız herhangi bir şeyde bulunmamıştır. Bilinç *bütün* canlılara ait bir özellik midir? Çoğunluk öyle olmadığını, sadece sinir sistemine sahip canlıların bilinçli olabileceğini düşünür; peki ama o zaman sinir sisteminin ne kadarı bilinç için gereklidir? Palyaço balıkları mercan resiflerindeki yuvalarını özler mi? Avrupa kızılgerdanımız kış yaklaşınca güneye uçmak için yanıp tutuşmuş mudur gerçekten, yoksa insansız hava aracı gibi otomatik pilota mı bağlamıştır her şeyi? Evcil hayvan besleyenlerin çoğu köpeklerinin, kedilerinin ya da atlarının bilinçli olduğuna inanır; o halde bilinç memelilerde mi ortaya çıkmıştır? Muhabbetkuşu ya da kanaryası olan pek çok kişiyse, kuşlarının kişilik sahibi ve onları kovalayan kediler kadar bilinçli olduğundan aynı derecede emindir. Ama bilinç kuşlarda ve memelilerde ortak bir özellikse, o zaman büyük olasılıkla bilinçli bir ortak atadan, belki de kuşların, memelilerin ve dinozorların atası olduğu düşünülen, üç yüz milyondan uzun zaman önce yaşamış *amniyot* denen ilkel sürüngen benzeri bir canlıdan gelen kalıtsal bir özelliktir. O zaman üçüncü bölümde karşılaştığımız Tyrannosaurus rex, Triyasik bataklığına gömülürken korkmuş muydu acaba? Peki daha ilkel hayvanlar gerçekten de bilinçsiz midir? Akvaryum sahibi pek çok kişi balıkların ya da ahtapot gibi yumuşakçaların bilinçli olduğunda ısrar eder ama bütün bu grupların ortak atasını bulmak için beş yüz milyon yıl geriye, Kambriyen

döneminde omurgalıların ortaya çıkışına gitmemiz gerek. Bilincin geçmişi gerçekten de bu denli eskiye mi dayanıyor?

Yanıtı bilmiyoruz elbette. Evcil hayvan sahipleri bile sadece tahmin yürütüyorlar, zira insan benzeri davranışın gerçek bilinçten nasıl ayırt edilebileceğini hiç kimse bilmiyor. Bilincin ne *olduğunu* bilmeden, hangi yaşam biçimlerinin bu özelliğe sahip olduğunu da bilemeyiz. Bu nedenle naif yaklaşımımız bu argümanlardan ve tartışmalardan kaçınmak ve bilincin gezegenimizde ne zaman ortaya çıktığı ya da hayvanlar âleminde hangi akrabalarımızın özfarkındalığı olduğu soruları karşısında bilinemezci bir tavır takınmak olacak. Başlangıç noktamız ayılar, bizonlar ya da yaban atlarına dair fikirlerini tarihöncesi mağara duvarlarına resmeden atalarımızın kesinlikle bilinçli olduğu konusundaki ısrarımızdır. Demek ki mikropların yaklaşık üç milyar yıl önce ilkel çamurda ilk ortaya çıkışı ile modern insanın on binlerce yıl önce mağara duvarlarını hayvan izlenimleriyle bezediği dönem arasında bir yerlerde, canlı organizmaları oluşturan maddede garip bir özellik belirdi: Bu maddenin bir kısmında farkındalık gelişti. Bu bölümde amacımız, bunun nasıl ve neden olduğu üzerine düşünmek ve bilincin ortaya çıkmasında kuantum mekaniğinin kilit rol oynadığına ilişkin tartışmalı görüşü incelemek.

İlkin, önceki bölümlerde olduğu gibi, insana dair bu en esrarengiz fenomeni açıklayabilmek için kuantum mekaniğine başvurmamız *gerekir* mi sorusunu soracağız. Kimilerinin yaptığı gibi, "bilinç gizemli ve saptanması zordur, kuantum mekaniği de gizemli ve saptanması zordur; o halde hiç kuşkusuz bu ikisi öyle ya da böyle bağlantılıdır," şeklinde bir bakış açısı benimsemek elbette ki yeterli değildir.

Ne kadar tuhaftır bilinç?

Evrenle ilgili bildiğimiz en garip gerçek, kafatasımızın içindeki kısmının olağanüstü özelliği, yani bilinçli zihnimiz sayesinde evrenle

ilgili bu kadar çok şey biliyor olmamız belki de. Bu sahiden de tuhaftır, özellikle de bu garip özelliğin işlevi hiç de belli olmadığı için.

Filozoflar bu soruyu genellikle zombilerin var olduğunu hayal ederek irdeler. Zombiler de insanların yaptığı şeyleri yapar, mağara duvarlarına resim çizer ya da kitap okurlar ama içsel bir hayatları yoktur; kafalarının içinde el-ayak hareketlerini ya da dille ilgili motor işlevleri yöneten mekanik hesaplamalar dışında bir şey bulunmaz. Zombiler farkındalığı ya da tecrübe duygusu olmayan otomatlardır. Yürümek, bisiklete binmek, bir müzik aleti çalmak için gereken hareketler gibi pek çok eylemi farkında olmaksızın ya da tecrübeyi hatırlamaksızın, bilinçsizce gerçekleştirebilmemiz (yani biz bu işlerle meşgulken bilinçli zihnimizin başka bir yerde olabilmesi), böyle varlıkların en azından kuramsal olarak var olabileceğine bir kanıttır. Hatta düşünerek yaptığımızda bu eylemlerdeki performansımız, mantığa aykırı olsa da, aksar. Görünen o ki, en azından bu eylemler için bilinç olmasa da olur. Peki ama bilinç olmaksızın yapılabilecek eylemler varsa şayet, bütün insansı etkinlikleri otomatik pilota bağlayarak gerçekleştirebilen bir yaratık hayal etmek en azından mümkün değil midir?

Görünüşe göre hayır, çünkü dil yetisi gibi bilincin vazgeçilmez olduğu bazı etkinlikler var. Otomatik pilota bağlayarak karşılıklı konuşmayı düşünmek çok zor. Çetrefilli bir hesaplama yapmak ya da bulmaca çözmek de otomatik yapılması zor işlerden. Buz devri sanatçımızın (tamamen keyfi bir şekilde ressamımızın kadın olduğunu varsayacağız) bilinci olmasaydı, önünde boş bir mağara duvarından başka bir şey yokken bir bizon resmi çizebileceğini de hayal edemeyiz. Bu bilinçli eylemlerin hepsinin ortak özelliği –bir sözcüğün altında yatan fikir, bir problemin çözümü ya da bir bizonun ne olduğu ve taş devri insanları için ne anlama geldiği gibi– *fikirler* tarafından yönlendirilmesidir. Gerçekten de Chauvet mağarasının duvarları fikirlerin en güçlü uygulamasına, özgün bir kavram yaratmak üzere bir araya getirilmesine ilişkin bir yığın kanıt sunar. Bir

kaya üzerine mesela, üstü bizon altı insan görünümlü, gerçekte var olması imkânsız bir figür çizilmiştir. Böyle bir figür ancak bilinçli bir zihin tarafından yaratılmış olabilir.

O halde fikir dediğimiz şey nedir? Amacımıza uygun düşecek şekilde fikirlerimizin, bizim için anlam taşıyan kavramlar (Chauvet mağarasının duvarındaki yarı-insan yarı-bizon varlık görüntüsünün bir zamanlar o mağarada yaşamış insanlar için taşıdığı anlam gibi) oluşturmak amacıyla bilinçli zihnimizde bir araya getirilen karmaşık bilgiyi temsil ettiğini kabul edeceğiz. Karmaşık bilginin tek bir fikre sıkıştırılması, ne kadar uzun olursa olsun bir müzikal kompozisyonu başından sonuna kafasında nasıl tamamladığını açıklayan Mozart'a atfedilen şu ifadede dikkati çeker: "Derken zihnim müziği, . . . gözümün bir anda ilişmesi gibi kavrar. Daha sonra yapacağım gibi üzerinde detaylı olarak çalışılmış farklı bölümler halinde peş peşe değil, imgelemimin duymama izin verdiği bütünlüğüyle gelir."[3] Bilinçli zihin, karmaşık bilginin "farklı bölümlerini kavrayabilme" becerisine sahiptir, böylece anlam "kendi bütünlüğü içinde" anlaşılabilir. Bilinç, zihnimizin salt uyaranlardan çok fikirler ve kavramlarla çalışmasını sağlar.

Peki ama karmaşık nöronal bilgi bilinçli zihinlerimizde bir fikir oluşturmak üzere nasıl bir araya getirilir? Bu soru bilinçle ilgili ilk bilmecenin, genellikle *bağlama problemi* olarak adlandırılan yönüdür. Beynimizin bambaşka bölgelerinde kodlanan bilgiler bilinçli zihnimizde nasıl bir araya getirilir? Bağlama problemi genellikle görsel ya da diğer duyusal bilgi diliyle ifade edilir. Shiseido'nun Nombre Noir parfümünün kokusu için Luca Turin'in çağrışımlarla dolu betimlemesini anımsayın: "Arka planda sedir ağacından yapılmış puro kutusunun, neredeyse kutsal, sert notalarıyla, gül ile menekşe arası ama her ikisinin de tatlı kokusundan iz taşımayan bir kokuydu." Turin parfümü, her biri belli bir koku reseptörü nöronunu ateşleyen ayrı ayrı kokuların bir karışımı olarak değil, puro ve menekşe gibi pek çok yardımcı kavramı da çağrıştıran farklı notalar ve tonlardan oluşmuş tek bir aroma olarak algılamıştı. Benzer

şekilde görüntüler ve sesler de farklı oranlarda renkler, dokular ya da notalar olarak değil; örneğin bir bizon, ağaç ya da insana ilişkin entegre duyusal izlenimler, anılar ve kavramlar olarak tecrübe edilir.

Taş devri ressamımızın gerçek bir bizonu gözlemlediğini hayal edin. Gözleri, burnu, kulakları ve bizon ölüyse parmak uçlarındaki dokunma reseptörleri hayvanın kokusu, biçimi, dokusu, hareketi ve sesi gibi pek çok duyusal izlenim yakalar. Beşinci bölümde kokuların koklama duyumuz tarafından nasıl yakalandığını görmüştük. Hatırlarsanız, koku moleküllerinin koku nöronlarına bağlanması üzerine sinir "ateşleniyor", yani burnun gerisindeki koku epitelinden beyindeki koku soğanına kadar akson (hücrenin süpürge sapına benzeyen uzantısı) boyunca elektrik sinyalleri gönderiliyordu. Bu ateşlenme işlemini, fikirlerimizde kuantum mekaniğinin potansiyel rolünü anlamamız açısından kilit nokta olduğu için bu bölümde daha sonra ayrıntılı olarak ele alacağız. Şimdilik bizonumuzdan yayılan sığır kokusu molekülünün ressamımızın burnuna ulaşarak koku reseptörüne bağlandığını ve akson boyunca telgraf sinyalini andıran ama telgraflardaki nokta ve çizgilerden çok, sadece noktalardan ya da bip seslerinden oluşan bir elektrik sinyalini tetiklediğini hayal edelim.

Koku sinirinde ilerleyen sinyal ressamımızın beynine ulaşınca pek çok başka siniri ateşlemiş, bip sinyali bir sinirden diğerine atlarken her sinir bir röle istasyonu gibi davranmıştır. Diğer duyusal veriler de benzer şekilde bip sinyalleri olarak yakalanır. Örneğin, ressamın gözünün retinasındaki koniler ve çubuklar (koku nöronları gibi özelleşmiş olan ama koku moleküllerine değil de ışığa cevaben çalışan nöronlar), optik sinirler vasıtasıyla beynin görme korteksine bir dizi bip sinyali yollamıştır. Her biri ayrı bir koku molekülüne yanıt veren koku nöronları gibi optik sinirler de retinaya düşen görüntünün sadece belli özelliklerine –kimileri belli bir renge ya da tona, kimileriyse kenarlar ya da hatlara veya belli bazı

dokulara– yanıt vermiştir. İç kulağındaki işitme sinirleriyse benzer şekilde sese, belki de mızrakla öldürülmüş bizonun gürültüyle solumasına tepki vermiş; hayvanın kürküne temas duyusu ise derisindeki *mekanosensitif* sinirler tarafından elde edilmiştir. Bütün bu örneklerde her duyu nöronu, duyusal girdinin yalnızca belli bazı özelliklerine tepki verir. Sözgelimi, belli bir işitme nöronu ressamın kulağına yalnızca belli frekansta bir ses ulaştığında ateşlenecektir. Ancak kaynağı ne olursa olsun, bütün sinirlerde oluşan sinyaller birbirinin kesinlikle aynıdır: duyu organından sanatçının beynindeki özelleşmiş bölgelere giden elektriksel bip sinyalleri. Söz konusu sinyaller beyindeki bu bölgelerde motor çıktıları tetiklemiş olabileceği gibi, sanatçının gözlemleriyle ilgili bir anı bırakmak üzere, hafızanın beyinde kodlanmasının temelini teşkil ettiği düşünülen "birlikte ateşlenen birlikte bağlanır" ilkesi uyarınca nöronlar arasındaki bağlantıyı değiştirmiş de olabilir.

Burada asıl önemli olan, bu muazzam duyusal sinyal akıntısının, bir bizonun bilinçli izlenimini oluşturmak üzere insan beynindeki 100 milyar civarında nöron içinde hiçbir yerde bir araya gelmemesidir. Aslında "akıntı", bilginin bir araya getirildiğini düşündürdüğü için doğru bir sözcük sayılmaz, zira nöronlarda böyle bir durum söz konusu değildir ve her sinyal tek bir sinirle sınırlı kalır. Dolayısıyla beyinde yol alan bilgiyi bir akıntıdan çok, yüz milyar nöron arasındaki trilyonlarca bağlantıdan oluşan devasa bir yumağın her bir ipliğinde yol alan bip bip bip . . . sinyal dizileri olarak düşünmelisiniz. Bağlama problemi, birbirinden apayrı bu bip kodlu bilginin nasıl olup da bütünleşmiş bir bizon algısı oluşturduğunu anlama problemidir.

Kaldı ki bağlanması gereken sadece duyusal izlenimler değildir. Bilincin hammaddesi, bağlamından koparılmış duyusal veriler değil, her biri bir yığın karmaşık bilgiyle yüklü anlamlı kavramlardır (bizon örneğinde tüylü, pis kokulu, ürkütücü ya da görkemli olma gibi). Taş devri ressamımızın, doğal pigmentlerle resmederken

hatırladığı tüylü, pis kokulu, ürkütücü ama görkemli bizona dair bir izlenim oluşturabilmesi için, bütün bu yan kavramların da duyusal izlenimlerle birlikte bağlanması zorunludur.[4]

Bağlama problemini duyusal izlenimlerden ziyade fikirlerle ifade etmek, bizi bilinç probleminin esasına, yani fikirlerin zihni, dolayısıyla da bedenleri nasıl harekete geçirebildiği bilmecesine getirir. Taş devri ressamımızı pigmenti kayaya sürmeye iten şeyin ne olduğunu, aklından o anda neler geçtiğini asla bilemeyeceğiz. Belki de bizon resminin mağaranın karanlık bir köşesini canlandıracağını düşünmüştür ya da belki hayvanın resmini yapmanın avcı dostlarına şans getireceğini. Ancak emin olabileceğimiz bir tek şey var ki o da şu: Ressam, bizon resmi yapma kararının kendi *fikri* olduğuna *inanmış* olsa gerek.

Evet ama fikir maddeyi nasıl harekete geçirir? Bütünüyle klasik bir varlık olarak düşündüğümüz beyin duyusal girdiler aracılığıyla aldığı bilgiyi tıpkı bir bilgisayar (ya da zombi) gibi işleyerek çıktılar oluşturur. İyi de bilinçli zihnimiz, istemli eylemlerimizin işleyişini sağladığına emin olduğumuz o "kendilik" hissi, arapsaçına dönmüş o bip sinyalleri içinde neredediir acaba? Bu *bilinç* dediğimiz şey neyin nesidir ve beynimizdeki maddeyle nasıl bir etkileşime girer de kollarımızı, bacaklarımızı ya da dilimizi hareket ettirmemizi sağlar? Bilinç ya da özgür iradenin tamamen deterministik bir evrende anlamı yoktur çünkü nedensellik yasaları, Chauvet mağarasından geriye Büyük Patlama'ya dek uzanan sonsuz bir neden-sonuç zincirinde bir şeyin ancak başka bir şeyden sonra olmasına izin verir.

Jean-Marie arkadaşlarıyla birlikte Chauvet mağarasındaki resimleri ilk gördükleri ânı şöyle anlatıyor: "Yalnız olmadığımız hissine kapılmıştık; etrafımız sanatçıların ruhları ve hayaletleriyle sarılıydı. Onların varlığını hissedebildiğimizi düşündük."[5] Mağaracıların derin, kimilerinin ifadesiyle ruhani bir deneyim yaşamış olduğu açık. Bir insanın ya da hayvanın kafatasının içine baktığımızda, bizon etinden pek de farkı olmayan, ıslak, yumuşak bir

dokuyla karşılaşırız. Ama kendi kafatasımızın içindeki o şeyin farkındalığı ve deneyimleri vardır ve bu kavramlar madde dünyasına ait değil gibi görünmektedir. Farkındalık ve deneyimden ibaret bu hafif şey, yani bilinçli zihnimiz, beynimizi oluşturan maddeye her nasılsa eylemlerimize *neden olacak* şekilde yön verir (en azından bizde bıraktığı izlenim budur). *Zihin-beden problemi* ya da bilincin *zor problemi* gibi farklı adlarla anılan bu bilmece, hiç kuşkusuz bütün varlığımızın en derin gizemidir.

Bu bölümde, kuantum mekaniğinin bu derin gizeme dair bazı yanıtlar verip veremeyeceğini soracağız. En başından şunu vurgulayalım: Gerçekte bilincin ne olduğunu ya da nasıl çalıştığını kimse bilmediğinden bilinçle ilgili fikirler aslında son derece spekülatiftir. Sinirbilimciler, psikologlar, bilgisayar bilimcileri ve yapay zekâ araştırmacıları bile bilinci açıklamak için insan beyninin katışıksız karmaşıklığının ötesinde bir şeyin gerekli olup olmadığı konusunda görüş birliğine varmış değildir.

Başlangıç noktamız, Ardèche'teki kalker kayaçları üzerinde o bizon figürünün belirmesine yol açan beyin süreçleri olacak.

Düşüncenin işleyişi

Bu bölümde, otuz bin yıl önce bir mağaranın duvarına kırmızı toprak boyasıyla çizilmiş bir çizgiden geriye doğru nedensellik zincirini izleyerek gideceğiz. Bu takip bizi, o çizgiyi çizen ressamın kolunda kasılan kaslardan, kasın kasılmasını sağlayan sinir uyartılarına, daha da geriye gidersek o sinirleri ateşleyen beyin uyartılarına ve olaylar zincirini başlatan duyusal girdilere götürecek. Amacımız, bilincin bu nedensellik zincirinde hangi aşamada devreye girdiğini saptamak ki sonrasında kuantum mekaniğinin bu olayda oynayabileceği rolü soruşturabilelim.

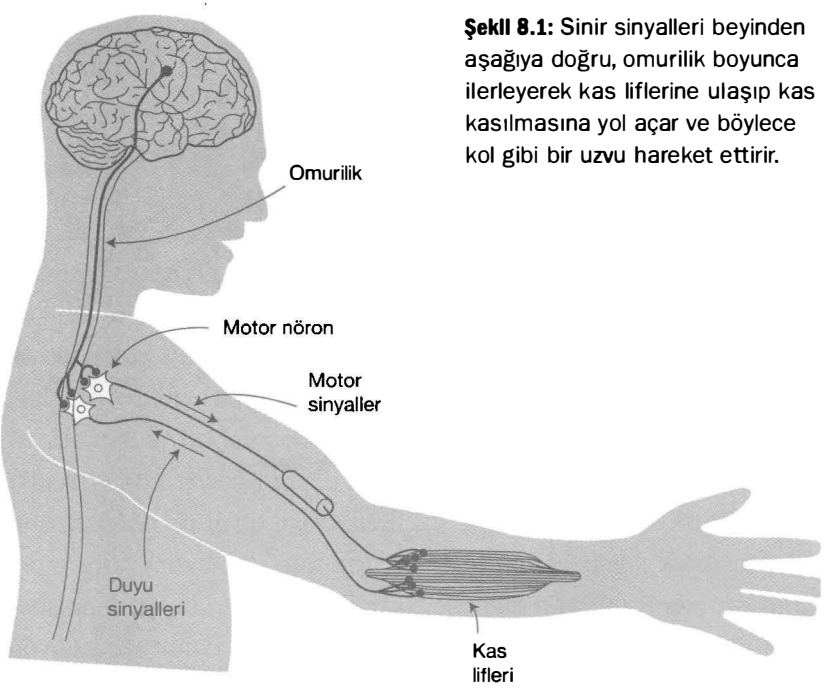
Binlerce yıl önceki bu sahneyi, belki de bir ayı postuna sarınmış, adı sanı belirsiz ressamımızın Chauvet mağarasının karanlığına doğru baktığını gözümüzde canlandırabiliriz. Resimler

mağaranın epeyce derinlerinde bulunmuştu; o halde mağaraya girerken yanında pigment dolu çömleklerin yanı sıra bir de meşale getirmiş olmalı. Derken bir an geliyor, ressam parmağını çömleğe daldırıp çıkarıyor ve boyayı duvara sürerek bir bizonun ana hatlarını çizmeye başlıyor.

Ressamın mağara duvarı üzerindeki kol hareketlerini başlatan, bir kas proteini olan miyozindir. Miyozin esasen kas liflerinin birbiri üzerinde kaymasını ve dolayısıyla kasların kasılmasını kimyasal enerji kullanarak sağlayan bir enzimdir. Bu kasılma mekanizmasının ayrıntıları onlarca yıldan beri yüzlerce bilim insanı tarafından ortaya çıkarılmış olup, nanoölçekli biyoloji mühendisliği ve dinamiğinin çarpıcı bir örneğini oluşturur. Ama bu bölümde, kas kasılmasının hayranlık uyandırıcı moleküler detaylarını bir kenara bırakıp, düşünce gibi kısa ömürlü bir şeyin kas kasılmasına nasıl neden olabileceği sorusuna odaklanacağız (şekil 8.1).

İlk akla gelen yanıt aslında öyle olmadığı. Ressamın kas liflerinin kasılmasını aslında pozitif yüklü sodyum iyonlarının kas hücrelerine hızla girişi tetiklemiştir. Kas hücrelerinin zarının dış tarafında, iç taraftakine göre daha fazla sodyum iyonu bulunduğu için zarın iki tarafı arasında, tıpkı minik bir pilde olduğu gibi bir voltaj farkı oluşur. Ancak bu zarlarda, açıldığı zaman sodyum iyonlarının hücreye girişini sağlayan, *iyon kanalları* denen minik delikler vardır. Ressamın kolundaki kas kasılmasını tetikleyen de bu elektriksel deşarj süreci olmuştur.

Nedensellik zincirimizde bir adım daha geriye gidersek şu soruyla karşılaşırız: Kaslardaki bu iyon kanallarının o anda açılmasını sağlayan neydi? Bu sorunun yanıtı, ressamın kol kaslarına bağlı *motor sinirler*in, iyon kanallarının aniden açılmasına yol açan nörotransmitter adlı kimyasalları salıvermesidir. Peki o zaman bu motor sinirlerin nörotransmitter paketlerini salıvermesine neden olan şey nedir? *Aksiyon potansiyeli denen* elektriksel sinyal, sinir sonlanmalarına ulaştığında nörotransmitterler salıverilir (şekil 8.2). Aksiyon

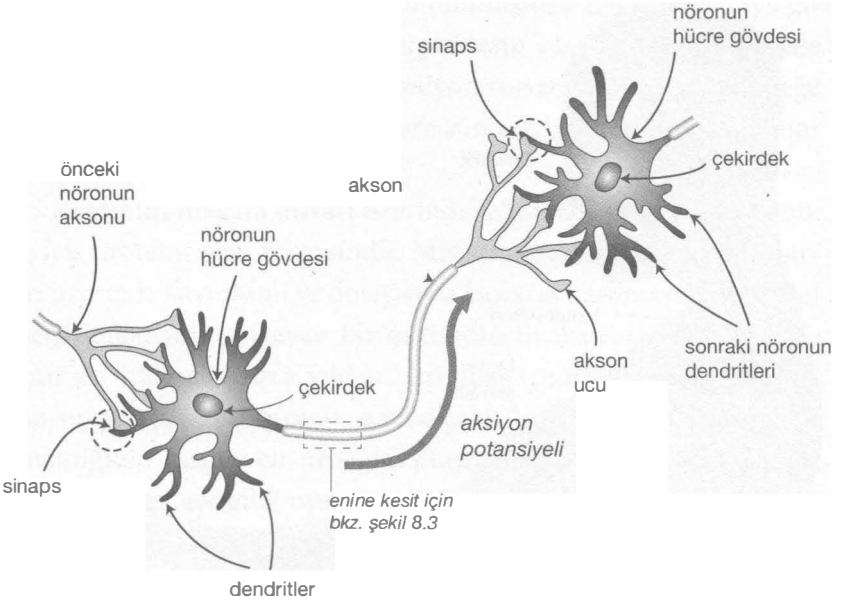


Şekil 8.1: Sinir sinyalleri beyinden aşağıya doğru, omurilik boyunca ilerleyerek kas liflerine ulaşıp kas kasılmasına yol açar ve böylece kol gibi bir uzvu hareket ettirir.

potansiyelleri bütün sinir sinyal mekanizmalarının temel unsuru olduğundan, işleyişine biraz daha yakından bakmamız gerek.

Nöron dediğimiz sinir hücresi, son derece uzun, ince, yılankavi bir hücredir ve üç kısma ayrılır. Baş kısmında örümceğimsi bir *hücre gövdesi* bulunur; aksiyon potansiyelinin başladığı yer burasıdır. Aksiyon potansiyeli, nöronun *akson* denen ince, orta kısmı (koku nöronunun "süpürge sapı" bölümü) boyunca, nörotransmitter moleküllerin salıverildiği sinir sonlanmasına doğru ilerler (şekil 8.2). Akson her ne kadar minicik bir elektrik kablosuymuş gibi görünse de, elektrik sinyalini iletme biçimi, negatif yüklü elektronların bakır tel boyunca ilerlemesiyle oluşan basit bir akımdan çok daha zekicedir.

Tıpkı kas hücresinde olduğu gibi, normalde sinir hücresinin de dışındaki pozitif yüklü sodyum iyonları içerisindekinden daha



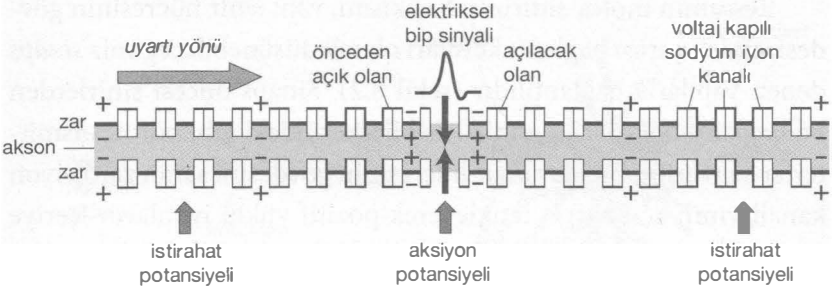
Şekil 8.2: Sinirler hücre gövdesinden sinir sonlanmasına doğru, akson boyunca elektrik sinyalleri gönderir ve sinir ucundan sinapsa nörotransmitter salıverilmesine yol açar. Nörotransmitter, bir sonraki nöronun hücre gövdesi tarafından yakalanınca, bu kez bu nöron ateşlenir ve sinir sinyali bir nörondan sonrakine böylelikle iletilmiş olur.

fazladır. Bu fark, pozitif yüklü sodyum iyonlarını sinir hücresinin zarından hücre dışına iten pompalar tarafından sağlanır. Dışarıda pozitif yüklerin daha fazla olması hücre zarının iki yanı arasında bir voltun yaklaşık yüzde biri kadar bir voltaj farkı yaratır. Kulağa pek fazla değilmiş gibi gelse de hücre zarlarının sadece birkaç nanometre kalınlığında olduğunu unutmayın; dolayısıyla sözünü ettiğimiz voltaj farkı çok kısa bir mesafe için geçerlidir. Yani hücre zarının iki tarafı arasında, metre başına bir milyon voltluk bir elektriksel fark vardır (voltaj dediğimiz de budur aslında). Bu da bir santimetrelik bir boşluk için, şoke edici bir değer olan on bin volta eşdeğerdir ve tıpkı arabanızın bujilerinde yakıtı tutuşturmak için gereken kıvılcım gibi bir kıvılcım yaratabilecek düzeydedir neredeyse.

Ressamın motor sinirinin baş kısmı, yani sinir hücresinin gövdesi, sinirler arası bağlantı kutuları olarak düşünebileceğimiz *sinaps* denen yapılarla bağlantılıdır (şekil 8.2). Sinaps öncesi sinirlerden bu bağlantı bölgelerine, sinir-kas bileşkesindeki gibi nörotransmitterler salıverilir; bu olay sinir hücresinin gövdesini saran zarda iyon kanallarının açılmasını tetikleyerek pozitif yüklü iyonların içeriye hücum etmesine, dolayısıyla voltajın aniden düşmesine neden olur.

Bir sinapstaki bir avuç iyon kanalının açılmasından kaynaklanan voltaj düşüşlerinin pek az ya da sıfır etkisi olur. Ancak çok fazla nörotransmitter ulaşırsa, o zaman çok sayıda iyon kanalı açılır. Hemen ardından pozitif iyonların hücre içine hücumu zar voltajının −0,04 voltluk kritik eşiğin altına inmesine neden olur. Bunun üzerine bir grup başka iyon kanalı devreye girer. Bunlar *voltaj kapılı iyon kanalları*, yani nörotransmitterlere değil, zardaki voltaj farkına karşı duyarlı kanallardır. Ressam örneğimizde, nöronun gövdesinde voltaj kritik eşiğin altına düşünce, bu kanallardan birçoğu açılıp sinir hücresi içine daha fazla iyon girmesini sağlamış, zarın bu kısmındaki kısa devre ağırlaşmıştır. Takip eden voltaj düşüşü, daha da fazla sayıda voltaj kapılı iyon kanalının açılmasına neden olarak daha fazla iyonun hücreye girmesini sağlamış, dolayısıyla zarın daha büyük bir bölümünde kısa devre oluşmasına yol açmıştır. Uzun sinir kablosu, yani akson, bu voltaj kapılı kanallarla döşeli olduğu için kısa devre hücre gövdesinde başlar başlamaz domino etkisi tarzında devam ederek, sinir sonlanmasına ulaşana dek sinir boyunca aksiyon potansiyeli halinde hızla ilerlemiştir (şekil 8.3). *Sinir-kas kavşağına* ulaşan aksiyon potansiyeli burada nörotransmitter salıverilmesini uyararak, ressamımızın mağara duvarına bizon resmi çizmesini sağlayan kol kasının kasılmasına neden olmuştur (şekil 8.1).

Bu açıklamadan, sinir sinyallerinin tel boyunca ilerleyen elektrik sinyalinden nasıl bir farklılık gösterdiğini anlayabilirsiniz. İlk olarak akım, yani yüklerin hareketi, sinir kabloları boyunca sinir sinyali yönünde değil, aksiyon potansiyeli yönüne dik ve hücre



Şekil 8.3: Aksiyon potansiyelleri aksonlar boyunca, sinir hücresi zarındaki voltaj kapılı iyon kanallarının etkisiyle ilerler. İstirahat halinde zarın dış tarafında, içeriye göre daha fazla pozitif iyon vardır. Ancak yukarı yönden gelen aksiyon potansiyelinin neden olduğu bir voltaj değişikliği iyon kanallarının açılmasına ve pozitif yüklü sodyum iyonlarının hızla hücre içine girmesine (aksiyon potansiyelinin oluşumuna) yol açarak zar voltajını geçici olarak tersine çevirir. Bu elektrik sinyali bir tür domino etkisi göstererek aşağı yöndeki iyon kanallarının açılmasını tetikler ve sinir boyunca ilerleyen elektriksel uyartı sinir sonlanmasına ulaşınca nörotansmitter salıverilmesini başlatır. Aksiyon potansiyeli geçip gittikten sonra iyon pompalarının etkisiyle zar normal istirahat potansiyeline geri döner.

zarındaki iyon kanalları yoluyla dışarıdan içeriye doğrudur. Ayrıca ilk iyon kanallarının açılmasıyla aksiyon potansiyelinin başlamasının hemen ardından kanallar tekrar kapanır ve iyon pompaları zarda başlangıçtaki voltajı yeniden oluşturmak üzere işe koyulur. Dolayısıyla sinir sinyalini, zardaki iyon kanallarının hücre gövdesinden başlayıp sinir sonlanmasına kadar devam eden bir açılıp kapanma dalgası, hareket eden bir elektriksel bip sinyali olarak düşünebiliriz.

Çoğu motor sinir hücresi için sinir-sinir kavşakları, bu hücrelerin yukarıdaki (sinaps öncesi) yüzlerce hatta binlerce sinirden nörotransmitter sinyali aldığı omurilikte yer alır (şekil 8.1). Yukarı sinirlerden bazıları bağlantı kutusuna (sinaps) hücre gövdesindeki iyon kanallarının açılmasını sağlayan nörotransmitterler salıvererek motor nöronun ateşlenme olasılığını artırırken, diğerleri bu kanalları kapama eğilimi gösterir. Bu şekilde her sinir hücresi,

bilgisayardaki mantık kapısı gibi davranır ve girdilere dayanarak bir çıktı –ateşlenmek veya ateşlenmemek– yaratır. Nöronu mantık kapısına benzetirsek, o zaman milyarlarca nörondan meydana gelen beyni bir tür bilgisayar olarak düşünebiliriz; en azından *hesaplamalı zihin kuramı*na katılan çoğu bilişsel sinirbilimcinin varsayımı budur.

Ama biraz hızlı gittik, henüz beyne ulaşmadık bile. Sinirler arası bağlantı kutularından epeyce nörotransmitter almış olsa gerek ki sanatçımızın motor siniri ateşlendi. Bu girdiler, birçoğu beyinden köken alan yukarı sinirlerden gelmiştir. Nedensellik zincirini geriye doğru takip edersek, bu sinirlerin hücre gövdeleri, ateşlenip ateşlenmeme kararını çok sayıda girdiye ve o girdileri oluşturan girdilere göre vermiştir; nedensellik zincirinde bu girdilerin izini ressamın gözlerinden, kulaklarından ve dokunma reseptörlerinden, dahası canlı ve ölü bizona dair daha önceki gözlemlerinden kaynaklanan duyusal girdilerin ulaştığı bellek merkezlerinden girdi sinyalleri alan sinirlere dek sürebiliriz. Duyusal girdiler ile motor çıktı arasında, bizonu çizmek için gereken motor çıktıyı oluşturma ya da oluşturmama kararını veren hesaplamaları gerçekleştiren *nöral* ağ yer alır.

Ressamın kolunu duvarın üzerinde hareket ettiren kasın kasılmasına yol açan olaylar zincirinin bütünü bundan ibaret. Ama gözden kaçırdığımız bir şey mi var acaba? Buraya kadar tarif ettiğimiz akış, duyusal girdiden motor çıktıya uzanan, bilginin kısmen bellek merkezleri kanalıyla geldiği, bütünüyle mekanistik bir nedensellik zinciridir. Bu, Descartes'ın hayvanların birer makine olduğunu iddia ederken (ikinci bölümde bahsetmiştik) sözünü ettiği türde bir mekanizmadır; tek yaptığımız kaldıraçlarla palangaları kaldırıp yerine sinirleri, kasları ve mantık kapılarını koymak oldu.

Ama unutmayın ki Descartes, insan davranışlarının nihai yönlendiricisi olarak manevi varlığına, ruhuna da bir rol biçmişti. Girdi ve çıktılardan oluşan bu olaylar zincirinde ruh neredeydi peki? Şimdiye kadar tarif ettiğimiz bir zombi sanatçıydı sadece. Peki ya onun

bilinci, mağara duvarına anlamlı bir bizon temsili çizme fikri, girdi ile çıktı arasındaki olaylar zincirine hangi aşamada girmiştir? İşte beyin biliminin en büyük bilmecesi hâlâ budur.

Zihin maddeyi nasıl harekete geçirir?

Çoğu insan öyle ya da böyle *düalizm* kavramına, yani zihin/ruh/bilincin fiziksel bedenden başka bir şey olduğuna muhtemelen inanır. Ancak düalizm yirminci yüzyılda bilimsel çevrelerde gözden düşmüştür ve nörobiyologların çoğu artık zihinle bedenin bir ve aynı olduğunu savunan *monizm* görüşünü yeğlemektedir. Sinirbilimci Marcel Kinsbourne örneğin, "bilinçlilik, sinirsel devrelerin belirli etkileşimli işlevsel durumlarda bulunması halidir" iddiasındadır.[6] Ancak bir bilgisayarın mantık kapıları, daha önce de belirttiğimiz gibi nöronlarla oldukça benzerdir; bu durumda, bir milyar civarında internet sunucusuyla –gerçi beyindeki yüz milyar nöronla karşılaştırıldığında küçük bir sayıdır bu– "web" (www) gibi birbirine yüksek düzeyde bağlanmış bilgisayarlar neden hiçbir farkındalık emaresi göstermemektedir? Kanlı canlı bilgisayarlar bilinçli olduğu halde silisyum bazlı bilgisayarlar neden zombidir? Mesele sadece, "web"de henüz karşılığı olmayan düzeyde bir karmaşıklıktan ve beyin hücrelerimizin "birbirine bağlı olması"ndan mı ibarettir,* yoksa bilinç çok farklı bir hesaplama türü müdür?

Bilinçle ilgili, üzerine bir yığın kitap yazılmış pek çok *açıklama* var elbette. Fakat sözünü ettiğimiz açıklamanın amaçlarına uygun düşecek şekilde, konumuzla en ilişkili olan, epey tartışmalı ama hayranlık uyandırıcı iddiaya, bilincin bir kuantum mekaniği fenomeni olduğu iddiasına odaklanacağız. Bu konu, insan zihninin bir

* İnternetin boyutlarını tahmin etmek kolay değil ama her web sayfası ortalama birkaç yüze yakın başka sayfaya bağlanırken nöronlar binlerce başka nöronla bağlantı kurar. Dolayısıyla internet sayfaları arasında bir trilyon kadar, insan beynindeki nöronlar arasındaysa bunun yüz katı kadar bağlantı vardır. Ancak internetin boyutu birkaç yılda bir iki katına çıktığından on yıl içinde insan beyninin karmaşıklığına rakip olması beklenmektedir. Sonrasında internet bilinç kazanacak mı peki?

kuantum bilgisayarı olduğunu iddia eden Oxfordlu matematikçi Roger Penrose'un 1989 tarihli kitabı *Kralın Yeni Aklı* (*The Emperor's New Mind*) adlı kitabıyla ünlü olmuştur.

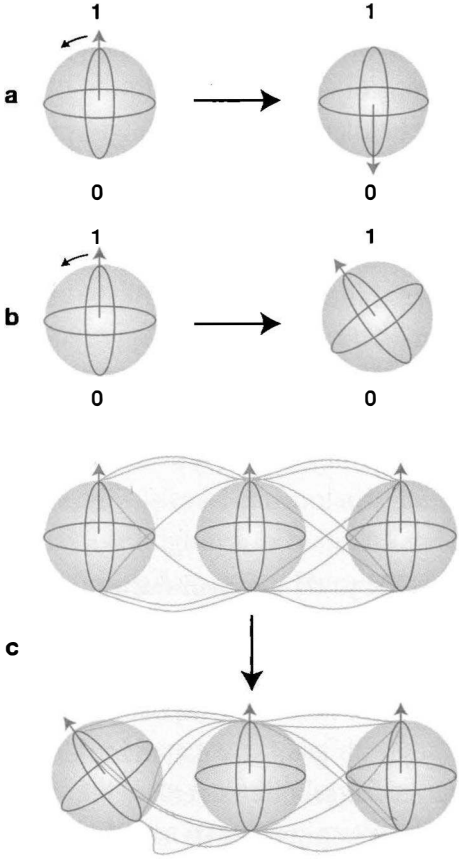
Kuantum bilgisayarı fikrini, bitkilerin kuantum bilgisayarları olduğunu iddia eden 2007 tarihli *New York Times* makalesinden bahsettiğimiz dördüncü bölümden anımsayacaksınız. MIT ekibi sonunda, mikrop ve bitki fotosentez sistemlerinin gerçekten de bir tür kuantum hesaplama yapıyor olabileceğine ikna olmuştu. Acaba ekiptekilerin zekâ küpü beyinleri de kuantum dünyasında çalışıyor olabilir miydi? Bu soruyu yanıtlamak için önce kuantum bilgisayarlarının ne olduğuna ve nasıl çalıştığına daha yakından bakmamız gerek.

Kübitlerle hesaplama

Günümüzde bilgisayar derken, AÇIK ya da KAPALI durumda bulunabilen ve her biri bir ikili basamağını (ya da *bit*) 1 ya da 0 olarak kodlayabilen bir grup elektrik anahtarı aracılığıyla bilgiyi manipüle etmek ya da işlemek için gereken komutları taşıyabilecek bir elektronik cihazı kastediyoruz. Böyle bir grup anahtar, mantıklı komutlar oluşturabilen devreler üretecek şekilde düzenlenerek, toplama-çıkarma gibi aritmetik işlemler yapmak ya da nöronlar için tarif ettiğimiz kapıları açıp kapamak için bir arada kullanılabilir. Bu elektrikli *dijital bilgisayar*ın en büyük avantajı, aynı işleri ister parmak hesabıyla, ister akıldan ya da kalem kâğıt kullanarak yapın, hepsinden çok daha hızlı çalışabilmesidir.

Ancak elektronik bilgisayarlar hesaplama konusunda olağanüstü hızlı olsa da, örtüşen sınırsız olasılıklarıyla kuantum dünyasının karmaşıklığına ayak uyduramaz. Nobel Ödüllü fizikçi Richard Feynman bu sorunu aşmak için olası bir çözüm ileri sürdü: hesaplamaları kuantum dünyasında, bir kuantum bilgisayarıyla yapmayı.

Kuantum bilgisayarlarının nasıl çalışabileceğini anlamak için öncelikle klasik bilgisayardaki "bit" kavramını, ibresi ya 1'i (kuzey kutbu) ya da 0'ı (güney kutbu) gösterebilen ve bu iki durum



Şekil 8.4: (a) 1'den 0 durumuna geçirilen klasik bir bit, klasik bir kürenin 180°'lik dönüşüyle temsil edilmiştir. (b) Açık-kapalı durumu değiştirilen bir kübit, kürenin istenen herhangi bir açıda dönüşüyle temsil edilebilir. Bununla birlikte kuantum uyumlu bir kübit pek çok dönüşün süperpozisyonu halinde bulunabilir. (c) Dolanıklık etkileşimleri her kürenin yüzeyine bağlı hayalî iplerle gösterilmiş kuantum uyumlu üç kübit. Kuantum hesaplamalarını simgeleyen şeyse dönüşler sonrası bu ipler üzerinde oluşan gerilimdir.

arasında geçiş yapabilmek için 180° dönebilen küresel bir pusula olarak düşünebilirsiniz (şekil 8.4a). Bir bilgisayarın merkezi işlem birimi (CPU) bu bir bitlik anahtarların milyonlarcasını içerir, dolayısıyla hesaplama sürecinin bütünü, bir yığın küresel pusulayı 180° çevirebilecek karmaşık bir geçiş kuralları kümesinin (algoritmalar) uygulaması olarak düşünülebilir.

Bitin kuantum hesaplamasındaki eşdeğerine *kübit* denir. Bu da klasik küreye* benzer ama hareketi 180°'lik takla ile sınırlı değildir.

* Fizikçi okurlarımız için, burada sözünü ettiğimizin Bloch küresi olduğunu söyleyelim.

Uzayda rastgele seçilmiş bir açıda dönebilir ve kuantum mekaniğine uygun şekilde kuantum uyumlu süperpozisyon halindeyken aynı anda pek çok yönü birden gösterebilir (şekil 8.4b). Bu artmış esnekliği kübitin klasik bite göre daha fazla bilgi kodlamasına olanak tanır. Ama hesaplama gücü açısından asıl fark, kübitler bir araya geldiğinde ortaya çıkar.

Klasik bir bitin durumu komşularını etkilemezken, kübitler *kuantum dolanıklık* gösterebilir. Altıncı bölümden hatırlarsanız dolanıklık, kuantum parçacıkların bireyselliğini yitirmesi sonucu, parçacıklardan birine bir şey olması halinde aynı anda hepsinin birden etkilendiği, kuantum uyumunda artış durumuydu. Kuantum hesaplama açısından bakıldığında dolanıklığı gözünüzde canlandırmak için, her bir kübit küresinin esnek iplerle diğer bütün kübitlere tek tek bağlı olduğunu hayal edebilirsiniz* (şekil 8.4c). Şimdi bu kürelerden sadece birini ekseni etrafında çevirdiğimizi düşünelim. Dolanıklık olmadığında bu çevirme işlemi komşu kübitleri etkilemeyecektir. Ama kübitimiz diğer kübitlerle dolanıksa, döndürme işlemi bağlı kübitler arasındaki bütün bağlantı iplerinde gerilimi değiştirecektir. Bu dolanık iplerin hesaplama olanakları kübit sayısı arttıkça *üssel* olarak, yani çok hızlı biçimde artar.

Üssel artışın boyutunu kavrayabilmeniz için bir örnek verelim: Satranç oyununun bulunmasından duyduğu memnuniyetle oyunun mucidini, dile benden ne dilersen diyerek ödüllendirmek isteyen Çin imparatoruyla ilgili hikâyeyi duymuşsunuzdur belki. Kurnaz mucit satranç tahtasının ilk karesi için bir, ikinci karesi için iki, üçüncüsü için dört ve sonraki kareler için de altmış dördüncü kareye ulaşana dek ikinin katları şeklinde artan sayıda pirinç tanesi ister. Bunun hayli mütevazı bir istek olduğunu düşünen imparator teklifi hevesle kabul eder ve hizmetkârlarına pirinç getirmelerini söyler. Fakat pirinç tanelerini saymaya başlayınca büyük bir hata yapmış olduğunu anlar.

* Gerçekte bu ipler Schrödinger'in denkleminde örneklenen dolanık kübitlerin faz ve amplitüdü arasındaki matematiksel ilişkiyi temsil eder.

İlk sıradaki karelerin toplamı için sadece 255 pirinç tanesi (2^8 eksi bir) gerekir, hatta ikinci sıranın sonuna kadar 32.768 tane, yani bir kilodan bile az pirinç yeterli gelir. Ama sonraki karelerde kilogramlar katlanarak artmaya başlayınca iş değişir ve imparator daha üçüncü sıranın sonuna gelindiğinde yarım ton pirinç vermesi gerektiğini anlayınca işin farkına varır. Beşinci sıranın sonuna gelmeden imparatorluğun iflas bayrağını çekmesi gerekir! Gerçekten de son kareye ulaşabilmek için 9.223.372.036.854.775.808 (2^{64} eksi bir) pirinç tanesi ya da 230.584.300.921 ton pirinç gerekir, yani kabaca tüm insanlık tarihi boyunca yeryüzünde üretilmiş olana eşdeğer miktarda pirinç.

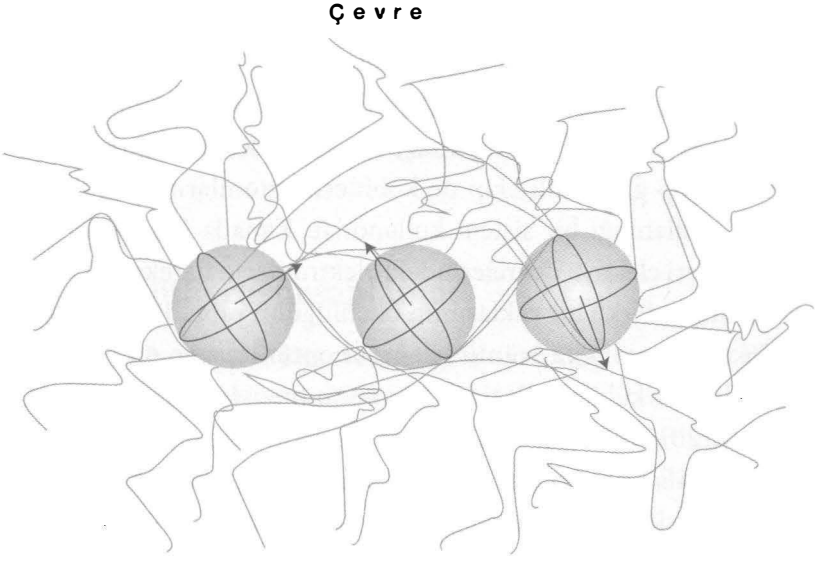
İmparatorun yanılgısının nedeni, bir sayının sürekli iki katını almanın üssel artışa sebep olduğunu, bir başka deyişle bir sayıyla bir sonraki sayı arasındaki artışın önceki sayının büyüklüğüyle orantılı olduğunu fark etmemesidir. Üssel büyüme, imparatora ağır bir bedel ödeten patlayıcı büyümedir. Hikâyedeki pirinç tanelerinin satranç tahtasındaki karelerin sayısına göre üssel olarak artmasına benzer şekilde kuantum bilgisayarının gücü de kübit sayısıyla üssel olarak ölçeklenir.

Böyle bir bilgisayar, gücü bit sayısıyla *doğrusal* olarak artan klasik bir bilgisayardan çok farklıdır. Sözgelimi, 8 bit klasik bir bilgisayara bir bit eklerseniz gücü sekizde bir oranında artar; gücünü iki katına çıkarmak için bit sayısını da iki katına çıkarmanız gerekir. Oysa bir kuantum bilgisayarına bir kübit eklemek onun gücünü iki katına çıkarır, yani imparatorun pirinçlerini tüketip bitiren türde bir üssel artışa neden olur. Aslına bakarsanız, bir kuantum bilgisayarı, hepsi hepsi 300 atomdan oluşan 300 kübit için uyum ve dolanıklığı koruyabilse, belli işlerde ulaşacağı performans, evren boyutlarında bir bilgisayarın performansını aşar!

Ancak –burası çok önemli– kuantum bilgisayarının çalışması için kübitlerin hesaplamaları yaparken (görünmez dolanık "ipler"i yoluyla) sadece birbirleriyle etkileşmesi gerekir. Bu da çevreden tamamen yalıtılmak zorunda oldukları anlamına gelir. Sorun şu ki,

dış dünyayla herhangi bir etkileşim, kübitlerin içinde bulunduğu ortamla dolanık hale gelmesine neden olur; bunu gözümüzde canlandırmak için, kübitleri farklı yönlere çekerek aralarındaki iplerle rekabet eden ve bu nedenle de yaptıkları hesaplamaya karışan pek çok başka ip oluştuğunu hayal edebiliriz. Bu aslında kuantum uyumunun bozulması sürecidir (şekil 8.5). En hafif etkileşimle bile ortam kübitlerin üzerine öyle kafa karıştırıcı dolanıklık ipleri atar ki kübitler birbiriyle uyumlu davranmayı bırakır; aralarındaki kuantum ipleri kopan kübitler o andan itibaren bağımsız klasik bitler gibi davranmaya başlar.

Kuantum fizikçileri dolanık kübitlerde uyumu korumak için, yoğunluğu çok düşürülmüş ve dikkatle kontrol edilen fiziksel sistemlerle çalışmak, bir avuç atomdaki kübitleri kodlamak, sistemi neredeyse mutlak sıfır derecesine soğutmak, cihazı hiçbir çevresel



Şekil 8.5: Bir kuantum bilgisayarında uyumsuzluğun nedeni, kübitlerin ortamdaki iplerden oluşan yumağıyla dolanıklığa girmesi olarak düşünülebilir. Bu ipler kübitleri bir o yana bir bu yana çektiği için kübitler kendi dolanıklık bağlantılarına yanıt veremez hale gelir.

etkiye maruz kalmayacağı yoğun bir yalıtıma sokmak yoluyla ellerinden geleni yaparlar.

Bu yaklaşımları kullanarak dönüm noktası sayılabilecek bazı başarılar kaydedilmiştir. IBM ve Stanford Üniversitesi'nden bilim insanları 2001 yılında, matematikçi Peter Shor'un bir kuantum bilgisayarında kullanılmak üzere 1994'te özel olarak geliştirdiği ve onun adıyla anılan akıllı kod Shor Algoritması'nı uygulayabilen "deney tüpü içinde yedi kübitlik bir kuantum bilgisayarı" yapmayı başardılar. Shor Algoritması sayıları asal çarpanlarına ayırmanın (istenen sayıyı elde etmek için birbiriyle çarpılması gereken asal sayıları bulmanın) etkili bir yöntemidir. Bu, gerçekten de çok büyük bir başarıydı ve bütün dünyada bilim haberlerine manşet oldu; oysa bu yavru kuantum bilgisayarı ilk uçuşunda alt tarafı 15 sayısını asal çarpanlarına ayırabilmişti (merak ediyorsanız 15'in asal çarpanları 3 ve 5'tir).

Geçen on yıl içinde önde gelen fizikçiler, matematikçiler ve mühendisler daha büyük ve daha iyi bir kuantum bilgisayarı yapmak için çok çabaladılarsa da ancak mütevazı bir ilerleme kaydedildi. 2011'de Çinli araştırmacılar, sadece dört kübit kullanarak 143 sayısını asal çarpanlarına ayırabildiler (13 x 11). Kendilerinden önceki ABD'li grup gibi Çinli ekip de kübitlerin, atomların spin durumlarıyla kodlandığı bir sistem kullandılar. Kanada firması D-Wave ise kübitleri elektrik devrelerindeki elektronların hareketi ile kodlayan oldukça farklı bir yaklaşımın öncülüğünü yaptı. Firma 2007'de, Sudoku'nun yanı sıra örüntü eşleme ve optimizasyon problemlerini çözebilen 16 kübitlik ilk ticari kuantum bilgisayarını geliştirdiğini açıkladı. 2013'te NASA, Google ve Üniversiteler Uzay Araştırmaları Birliği (USRA) ortaklaşa, D-Wave tarafından üretilmiş, NASA'nın dış gezegenleri (güneşimizin değil başka yıldızların etrafında dönen gezegenler) araştırmak için kullanmayı planladığı 512 kübitlik bir cihaz satın aldı. Ancak şimdiye kadar firmanın uğraştığı problemler konvansiyonel bilgisayar gücünün erişebildiği sınırlardadır ve birçok kuantum hesaplama uzmanı, D-Wave teknolojisinin

gerçekten de kuantum hesaplama olup olmadığından ya da öyleyse bile, tasarımının onu klasik bir bilgisayardan daha hızlı kılıp kılmayacağından emin değildir.

Seçtikleri yaklaşım ne olursa olsun, deneyleri yapan araştırmacıları, günümüzün çaylak kuantum bilgisayarları kuşağını işe yarar hale getirme yolunda çok büyük zorluklar bekliyor. En büyük sorunsa ölçekleme. Eklenen her bir kübit, sadece kuantum hesaplama gücünü değil, kuantum uyumunu ve dolanıklığı koruma zorluğunu da iki katına çıkarır. Atomların daha soğuk tutulması, yalıtımın daha etkili olması gerekir ve kuantum uyumunu saniyenin birkaç trilyonda biri süresince korumak gittikçe zorlaşır. Bilgisayar en basit hesaplamayı bile tamamlayamadan çok önce uyumsuzluk sisteme hâkim olur. (Bununla birlikte bu kitabın yazıldığı sırada, oda sıcaklığında nükleer spin durumlarında kuantum uyumunun korunabildiği rekor süre şaşırtıcı olmakla beraber 39 dakikadır.[7]) Ama daha önce de gördüğümüz gibi, canlı hücreler uyumsuzluğu, fotosentetik komplekslerde eksitonların ya da enzimlerde elektron ve protonların taşınması için yeterince uzun süre uzak tutabilir. Benzer şekilde uyumsuzluğun merkezi sinir sisteminde de uzak tutulmasıyla, beyinde kuantum hesaplamanın gerçekleşmesi mümkün müdür?

Mikrotübüllerle hesaplama?

Penrose'un beynin bir kuantum bilgisayarı olduğuna ilişkin ilk argümanının pek beklenmedik bir dayanağı vardı: Avusturyalı matematikçi Kurt Gödel'in ileri sürdüğü ünlü (en azından matematik çevrelerinde) eksiklik teoremleri. Bu teoremler 1930'lu yıllarda, temelde aritmetiğin bütünüyle tutarlı olup kendisiyle çelişmediğini ve doğru önermelerin doğru, yanlış önermelerin yanlış olduğunu ispatlayabilecek güçlü bir matematiksel aksiyomlar kümesi belirlemek üzere güvenle kolları sıvamış olan matematikçiler için şok ediciydi. Kulağa sadece matematikçilerin ve filozofların endişe

duyacağı türden bir şey gibi gelse de, bu mesele mantık alanında önemli bir konu olagelmiştir. Gödel'in eksiklik teoremleri böyle bir çabanın başarısızlığa mahkûm olduğunu göstermiştir.

Gödel'in teoremlerinden ilki, doğal dil ya da matematik gibi mantıksal dizgelerde, kendi içinde kanıtlanamayan bazı doğru önermeler bulunabileceğini göstermiştir. Bu, zararsız bir sav gibi görünebilirse de çok başka alanlara uzanan doğurguları olmuştur. Dil gibi bilindik bir mantık dizgesini ele alalım: "Bütün insanlar ölümlüdür. Sokrat bir insandır" önermelerinden akıl yürütmeyle "Sokrat ölümlüdür" sonucuna varabiliriz. Son önermenin mantıksal olarak ilk iki önermeyi izlediğini görmek ve basit bir cebirsel kurallar kümesiyle biçimsel olarak ispatlamak kolaydır (A = B ve B = C ise A = C). Fakat Gödel, matematiksel teoremleri kanıtlamaya yetecek kadar karmaşık bir mantıksal dizgenin temelinde bir sınırlılık olduğunu göstermiştir: Dizgenin kuralları uygulanarak doğru önermeler oluşturulabilir ama bu önermeler, kendilerini oluşturmak için en başta kullandığımız araçlarla ispatlanamaz.

Bir hayli garip görünüyor; gerçekten de garip aslında. Bununla birlikte –işte burası önemli– Gödel'in teoremi bazı doğru önermelerin kanıtlanamaz olduğu anlamına gelmez. Bir kurallar kümesi, bir başka kurallar kümesi tarafından oluşturulmuş ve bu yüzden o kurallar kümesi tarafından kanıtlanamayan önermelerin doğruluğunu kanıtlayabilir. Örneğin; doğru ama kanıtlanamaz olan dil önermeleri cebirsel kurallarla kanıtlanabilir (tam tersi de geçerlidir).

Kuşkusuz konunun inceliklerine haksızlık edecek düzeyde bir aşırı basitleştirmeye kaçıyoruz. Konuya ilgi duyan okurlar, Amerikalı bilişsel bilimler profesörü Douglas Hofstadter'in bu ve bağlantılı konular üzerine yazmış olduğu, 1979 tarihli kitabına başvurabilir.[8] Burada önemli olan, Penrose'un *Kralın Yeni Aklı* adlı kitabında ilk olarak, klasik bilgisayarların önermelerini oluşturmak için biçimsel mantık dizgeleri (bilgisayar algoritmaları) kullandığına dikkat çekerek Gödel'in eksiklik teoremlerini kendi argümanının başlangıç

noktası olarak kabul etmesidir. Gödel'in teoremine bakılırsa klasik bilgisayarlar kanıtlayamayacakları doğru önermeler de oluşturabilmelidir. Ancak, der Penrose, insanlar (ya da en azından bu türün matematikçi olan mensupları) doğru olan ama ispatlanamayan bu bilgisayar önermelerinin doğruluğunu ispatlayabilmektedir. O nedenle, hesap edilemez ("non-computable") işlemler olarak adlandırdığı işlemleri yapabilen insan zihninin klasik bir bilgisayardan çok daha fazlası olduğunu savunur. Ve bu hesap edilemezliğin, sadece kuantum mekaniğinin sağlayabileceği fazladan bir şey gerektirdiğini varsayar. Bilincin, bir kuantum bilgisayarı gerektirdiğini iddia eder.

Hiç kuşkusuz bunu, zor bir matematiksel önermenin ispatlanabilirliğinden hareketle iddia etmek fazlasıyla cesur bir davranış; bu konuya geri döneceğiz. Ancak daha sonra yazdığı kitabı *Zihnin Gölgeleri*'nde (*The Shadows of the Mind*) Penrose daha da ileri giderek, beynin hesaplamaları kuantum dünyasında yapabileceği bir fiziksel mekanizma ileri sürmüştür.[9] Penrose ve birlikte çalışmaya başladığı Arizona Üniversitesi'nden anesteziyoloji ve psikoloji profesörü Stuart Hameroff* nöronlarda bulunan *mikrotübül* denen yapıların kuantum beyinlerin kübitleri olduğunu iddia etmiştir.[10]

Mikrotübüller, tübülin denen bir proteinden oluşan uzun ipliklerdir. Hameroff ve Penrose, ipliğe dizili boncuklara benzetebileceğimiz tübülin proteinlerinin en az iki farklı şekil (uzamış ya da kısalmış) arasında gidip gelebildiğini ve en önemlisi kübitler gibi aynı anda her iki biçimin süperpozisyonu halinde bulunan kuantum varlıklar olarak davranabildiğini ileri sürmüştür. Bu kadarla da kalmayıp, bir nörondaki tübülin proteinlerinin başka pek çok nörondaki tübülin proteinleriyle dolanık olduğu varsayımında bulunmuşlardır. Hatırlarsanız dolanıklık, birbirine çok uzak nesneleri bağlayabilen "uzak mesafeden hayaletimsi etki"ydi. İnsan beynindeki yüz milyar nöron arasında hayaletimsi bağlantılar olması

* Johnjoe *Quantum Evolution* [*Kuantum Evrimi*] adlı kitabında adını yanlış yazdığı Stuart Hameroff'tan bu vesileyle özür diliyor.

mümkünse, o zaman bu bağlantılar ayrı sinirlerde kodlanmış bütün bilgiyi birbirine bağlayarak bağlama problemini çözebilirdi. Ayrıca bilinçli zihne kuantum bilgisayarının anlaşılması zor ama olağanüstü becerilerini kazandırabilirdi.

Penrose-Hameroff bilinç kuramının, kütleçekiminin oynadığı rol gibi daha da tartışmalı başka yönleri de var.* Peki kuram güvenilir mi? Biz dahil nörobiyologlar ve kuantum fizikçilerinin hemen hiçbiri bu konuda ikna olmuş değil. En bariz itirazlardan biri, daha önce tarif ettiğimiz şekliyle bilginin beyinden sinirler yoluyla yayılma biçimiyle ilgili. O tarifte mikrotübüllerin adının geçmediği dikkatinizi çekmiş olabilir. Geçmedi çünkü gerekmiyordu, zira bildiğimiz kadarıyla, mikrotübüllerin nöral bilgi işlemde doğrudan bir rolü yok. Mikrotübüller her nöronun mimarisini destekler ve nörotransmitterlerin hücre boyunca ileri ve geri naklini sağlar; ancak beyindeki hesaplamalardan sorumlu olan ağ tabanlı bilgi işlemle ilgili olmadıkları düşünülmektedir. Yani mikrotübüllerin düşüncenin ham maddesi olması pek muhtemel değildir.

Fakat belki daha da önemli bir itiraz noktası, beyindeki mikrotübüllerin, fazla büyük ve karmaşık yapılarından dolayı, uyumlu kuantum kübitleri adayı olma ihtimalinin son derece zayıf olmasıdır. Daha önceki bölümlerde, fotosentez sistemlerinden enzimlere, koku reseptörlerine, DNA ve kuşlardaki kavranması zor manyetik algılamaya varan çok geniş ölçekteki biyolojik sistemlerde kuantum uyumundan, dolanıklık ve tünellemeden söz etmiştik. Ancak bütün bunların temel özelliği, sistemin "kuantum" kısmının (eksiton, elektron, proton ya da serbest radikal) basit olmasıdır. Bu kısım yapacağını atom ölçeğindeki mesafelerde yapan tek ya da az sayıda

* Bu da bir başka zor kavramdır; ancak Penrose yeterince karmaşık (o nedenle de daha masif) kuantum sistemlerin kütleçekimi etkisinin, uzay-zamanda dalga fonksiyonunu çökerten bir bozulma yarattığını, böylece kuantum sistemleri klasik sistemlere dönüştürdüğünü ve düşüncelerimizin bu süreçle oluştuğunu öne sürerek, kuantum mekaniğinin ölçüm sorununa tamamen kendine özgü bir yorum önermiştir. Bu sıradışı kuramın ayrıntılarını Penrose'un kitaplarında bulabilirsiniz, ancak bugüne kadar onun bu önerisinin kuantum fiziği camiasında pek az taraftar bulduğunu söylemek haksızlık olmayacaktır.

parçacıktan oluşur. Bu da tabii ki Schrödinger'in kuantum kurallarını destekleme eğilimindeki canlı sistemlerin az sayıda parçacık içerdiğine ilişkin yetmiş yıllık sezgisiyle uyumludur.

Ama Penrose-Hameroff kuramı, milyonlarca parçacıktan oluşan protein moleküllerinin sadece aynı mikrotübül içindeki moleküllerle değil, beynin bütünündeki milyarlarca sinir hücresinde bulunan ve yine milyonlarca parçacıktan oluşan mikrotübüllerle kuantum süperpozisyonda ve dolanık olduğunu ileri sürer. Bu görüş makul olmaktan çok uzaktır. Her ne kadar bugüne dek beyindeki mikrotübüllerde kuantum uyumunu ölçebilen olmadıysa da, hesaplamalar tek tek mikrotübüllerde dahi uyumun birkaç pikosaniyelik zaman ölçeğinden daha uzun süre korunamayacağını düşündürmektedir[11] ki bu, beynin hesaplamasında herhangi bir etki göstermeyecek kadar hızla akıp giden bir süredir.*

Ancak Penrose-Hameroff kuantum bilinç kuramının daha da temel bir sorunu, Penrose'un baştaki, beynin bir kuantum bilgisayarı olduğu iddiasıdır. Penrose'un bu iddiasını, insanların Gödelvari önermeleri ispatlayabildiği, bilgisayarlarınsa ispatlayamadığı savına dayandırdığını hatırlayacaksınız. Ama bu, kuantum hesaplamanın beyinde ancak, kuantum bilgisayarları Gödelvari önermeleri klasik bir bilgisayardan daha iyi ispatlayabilirse söz konusu olabileceğini düşündürür; bu sava dair hiçbir kanıt olmadığı gibi çoğu araştırmacı tam tersine inanmaktadır.[12]

Bir başka nokta daha var; insan beyninin Gödelvari önermeleri ispatlama konusunda klasik bir bilgisayardan daha iyi performans *gösterebildiği* kesin değildir. İnsanlar bilgisayar tarafından oluşturulmuş ispatlanamaz bir Gödelvari önermenin doğruluğunu ispatlayabilirken, bilgisayarların da insan zihni tarafından oluşturulmuş ispatlanamaz bir Gödelvari önermenin doğruluğunu ispatlayabilmesi aynı derecede mümkündür. Gödel'in teoremi sadece bir mantık dizgesinin kendi önermelerini ispatlayabilme yeterliliğini sınırlar; bir

* Bir pikosaniye, bir saniyenin milyon kere milyonda biridir (10^{-12}).

mantık dizgesinin, bir başka mantık dizgesi tarafından oluşturulmuş Gödelvari önermelerini ispatlama yeterliliğini sınırlamaz.

Bu, kuantum mekaniğinin beyinde rolü olmadığı anlamına mı geliyor? Vücudumuzun başka yerlerinde onca kuantum eylem gerçekleşirken, düşüncelerimizin tamamen klasik dünyadaki buhar motorunun çalışmasına benzer süreçlere tabi olması mantıklı mı? Belki de değil. Yeni araştırmalar kuantum mekaniğinin gerçekten de zihnin işleyişinde kritik bir rol üstleniyor olabileceğini düşündürmekte.

Kuantum iyon kanalları?

Beyinde kuantum mekaniği fenomeni için olası bir yer nöronların hücre zarındaki iyon kanallarıdır. Daha önce de gördüğümüz gibi, bu kanallar beyinde bilgiyi ileten aksiyon potansiyellerine, yani sinir sinyallerine aracılık ettiği için nöral bilgi işlemde merkezi konumdadır. Kanalların uzunluğu bir metrenin milyonda biri (1,2 nanometre), genişliğiyse bunun yarısı kadardır sadece; dolayısıyla iyonlar kanallardan tek sıra halinde geçmek zorundadır. Yine de bunu olağanüstü bir hızla, saniyede yüz milyon kadar iyon geçecek şekilde yaparlar. Ayrıca kanallar yüksek düzeyde seçicidir. Örneğin, soydum iyonu potasyumdan biraz daha küçüktür, bu yüzden potasyum iyonunun sığabileceği her yerden kolayca geçebilmesini beklersiniz; oysa potasyum iyonlarının hücreye girişine izin veren kanal, on bin potasyum iyonu başına yaklaşık bir sodyum iyonunun hücreye girmesine izin verir.

Aksiyon potansiyellerinin hızından, dolayısıyla düşüncelerimizin beynimizdeki iletiminden bu çok yüksek taşınma hızı ile olağanüstü seçiciliğin bir araya gelmesi sorumludur. Ancak iyonların nasıl olup da böylesine hızlı ve seçici biçimde taşınabildiği sorusu gizemini korumaktadır. Kuantum mekaniğinin bir faydası olabilir mi? Kuantum mekaniğinin fotosentezde enerji taşınmasını artırabildiğini dördüncü bölümde görmüştük.

Beyindeki iyon taşınmasını da artırıyor olabilir mi acaba? Salzburg Üniversitesi'nden sinirbilimci Gustav Bernroider, Viyana Teknoloji Üniversitesi Atom Enstitüsü'nden Johann Summhammer ile birlikte 2012 yılında, voltaj kapılı iyon kanalından geçen bir iyonun kuantum mekaniği simülasyonunu gerçekleştirmiş ve iyonun kanaldan geçerken bir parçacıktan çok uyumlu bir dalga gibi yersizleştiğini (yayıldığını) bulmuştur. Ayrıca bu iyon dalgası çok yüksek frekanslarda salınım yapar ve etrafındaki proteine bir tür rezonans yoluyla enerji aktarır. Böylelikle kanal, iyonun kinetik enerjisini yarı yarıya azaltan etkili bir *iyon soğutucusu* olarak işlev görür. İyonun bu şekilde etkin biçimde soğutulması, uyumsuzluğu uzak tutarak iyonun yersizleştirilmiş kuantum durumunu korumasına yardımcı olur ve kanaldan hızlı kuantum taşımayı teşvik eder. Soğutmanın seçiciliğe de katkısı vardır; zira potasyum yerine sodyum geldiğinde soğutmanın derecesi çok farklıdır. Yapıcı girişim potasyum iyonu taşınmasını teşvik ederken, yıkıcı girişim sodyum iyonu taşınmasını inhibe edebilir. Çalışmayı yapan ekip, iyonların sinirlerdeki iyon kanallarından iletiminde kuantum uyumunun "vazgeçilmez", dolayısıyla düşünme sürecimizin de elzem bir parçası olduğu sonucuna varmıştır.[13]

Şunun altını çizelim: Bu araştırmacılar kuantum uyumlu iyonların ne bir tür nöral kübit gibi davranabildiğini ne de bilinçte rol oynadığını ileri sürmüştür ve ilk bakışta bu iyonların, bağlama problemi gibi bilinçle ilgili problemlerin çözümüne nasıl bir katkı sağlayabileceğini anlamak zordur. Ancak Penrose-Hameroff hipotezindeki mikrotübüllerden farklı olarak iyon kanallarının en azından nöral hesaplamadaki rolü açıktır (aksiyon potansiyellerini oluştururlar). Dolayısıyla kanalların durumu sinir hücresinin durumunu yansıtır: Sinir ateşlenmişse iyonlar akış halindedir (kuantum dalgaları şeklinde hareket ettiklerini unutmayın); sinir istirahat halindeyse kanallardaki iyonlar da hareket etmeyecektir. Beynimizde ateşlenen ve ateşlenmeyen nöronların toplamı şu ya da bu şekilde düşüncelerimizi kodladığına göre, düşünceler de iyonların sinir

hücrelerimizin içine ve dışına doğru gerçekleştirdiği kuantum akışının toplamıyla yansıtılır, yani kodlanır.

Evet ama tekil düşünce süreçleri, bilinçli ve bağlı düşünceler oluşturmak üzere nasıl bir araya getirilir? İster kuantum ister klasik olsun, tek bir uyumlu iyon kanalı, bizon gibi karmaşık bir nesnenin görselleştirilmesiyle sonuçlanan düşünce süreçlerinde birbirine bağlanmış bütün bilgileri kodlayamaz. Bilinçte rol oynuyor olabilmesi için, iyon kanalları o ya da bu şekilde bağlantılı olmak zorundadır. Kuantum mekaniğinin faydası olabilir mi? Sözgelimi, bir kanaldaki iyonların kanal boyunca kuantum uyumlu olmakla kalmayıp, aynı zamanda komşu kanallardaki, hatta yakın sinir hücrelerindeki iyonlarla uyumlu ve hatta dolanık olması mümkün mü? Öyle olmadığı hemen hemen kesin. İyon kanalları ve içlerindeki iyonlar, Penrose-Hameroff'un mikrotübül fikriyle aynı sorundan mustariptir. Tek bir iyon kanalının aynı sinir hücresindeki komşu iyon kanalıyla dolanık olması akla yakın gibi görünse de, bağlama problemini çözmek için, farklı sinirlerdeki iyon kanalları arasında olması gereken dolanıklığın, canlı bir beynin uyumsuzluğa yol açan sıcak, ıslak ve son derece dinamik ortamında gerçekleşmesi olanaksızdır.

Peki, dolanıklık iyon kanallarındaki kuantum düzeyinde bilgiyi bağlayamıyorsa, bu işi yapabilecek başka bir şey var mı? Olabilir. Voltaj kapılı iyon kanalları, açılıp kapanmalarını sağlayan voltaja duyarlıdır elbette. Voltaj, bir elektrik alan farkının ölçümüdür sadece. Ancak beynin her tarafı, kendi sinirlerinin elektriksel aktivitesinden kaynaklanan kendi elektromanyetik (EM) alanıyla doludur. Bu alan, elektroansefalografi (EEG) ya da manyetoansefalografi (MEG) gibi beyin tarama teknolojilerinin rutinde saptadığı şeydir ve o görüntülerden birine şöyle bir bakmak bile alanın olağanüstü karmaşık ve bilgiden zengin olduğunu anlamanıza yeter. Sinirbilimcilerin çoğu, EM alanın beyin hesaplamasındaki olası rolünü göz ardı etmiştir çünkü EM alanın, tıpkı trenin buhar düdüğü gibi, beyin etkinliğinin bir ürünü olduğunu ama onun üzerinde bir etkisi olmadığını varsaymışlardır. Oysa Johnjoe gibi bazı bilim insanları

son zamanlarda bilinci, beyindeki ayrık madde parçacıklarından birleşik EM alana kaydırmanın bağlama problemini çözebileceği ve bilinci bir yere oturtabileceği fikrini değerlendirmektedir.[14]

Bunun nasıl işleyebileceğini anlamak için, *alan* sözüyle ne kast ettiğimizi biraz daha açmalıyız. Bu terim kökenini, ekim alanı ya da oyun alanı gibi uzamda yayılan yer anlamında kullanıldığı günlük konuşma dilinden alır. Fizikte kullanılan "alan" da esasen aynı anlamı taşımakla birlikte, genellikle cisimleri hareket ettirebilen enerji alanlarından bahsedilir. Kütleçekimsel alanlar kütlesi olan herhangi bir şeyi, elektrik ya da manyetik alanlarsa sinirdeki iyon kanallarında bulunan iyonlar gibi, yüklü ya da manyetik parçacıkları hareket ettirir. James Clerk Maxwell 19. yüzyılda elektrik ile manyetizmanın, aynı fenomenin (elektromanyetizma) iki farklı veçhesi olduğunu bulmuştur; bu nedenle ikisini bir arada EM alan olarak adlandırıyoruz. Einstein'ın bir tarafında enerji, diğer tarafında kütlenin bulunduğu ünlü denklemi $E = mc^2$, enerji ile kütlenin biribirine dönüşebilir olduğunu göstermiştir. O halde beynin EM alanı –Einstein'ın denkleminde sol taraf– en az beyindeki nöronları oluşturan madde kadar gerçektir ve nöron ateşlenmesiyle oluştuğu için, beynin nöral ateşlenme örüntüleriyle tastamam aynı bilgiyi kodlar. Ancak nöronal bilgi, bip sinyali veren nöronlarda kısılıp kalırken, bütün o bip sinyallerinin oluşturduğu elektriksel aktivite beynin EM alanı içindeki bilginin hepsini bütünleştirir. Bu yaklaşım potansiyel olarak bağlama problemini çözebilir.[15] Ayrıca voltaj kapılı iyon kanallarının açılıp kapanmasıyla EM alan, kanallardan geçen kuantum uyumlu iyonlara da bağlanmış olur.

Bilince dair EM alan kuramları yüzyılımızın başında ilk kez ortaya atıldığında, beynin EM alanının sinir ateşleme örüntülerini, düşüncelerimizi ve eylemlerimizi yönlendirecek şekilde etkileyebildiğine ilişkin doğrudan kanıt yoktu. Ancak son zamanlarda farklı laboratuvarlarda yapılan deneyler, beynin oluşturduğuna benzer kuvvet ve yapıya sahip harici EM alanların sinir ateşlemesini gerçekten de etkilediğini göstermiştir.[16] Aslında alanın yaptığı şey

göründüğü kadarıyla sinir ateşlemesini koordine etmek, bir başka deyişle çok sayıda nöronu birlikte ateşlenebilecekleri şekilde senkronize etmektir. Bu bulgular, beyinde sinir ateşlenmesiyle oluşan EM alanın da ateşlenmenin kendisini etkilediğini ve böylece birçok kuramcının bilincin ana bileşeni olduğunu savunduğu öz referanslı bir tür döngü oluşturduğunu düşündürmektedir.

Sinir ateşlenmesinin beynin EM alanı tarafından senkronizasyonu, sinir aktivitesinin bilinçle bağıntılı olduğu bilinen çok az sayıda özelliğinden biri olduğu için, bilinç bilmecesi bağlamında çok önemlidir. Sözgelimi gözümüzün önünde duran bir cismi –mesela gözlüğümüzü– ararken, onu karmakarışık bir yığın başka nesne arasında birdenbire fark ettiğimiz anlar olur. O karmaşaya baktığımız sırada, aradığımız nesneyi kodlayan görsel bilgi gözlerimiz yoluyla beynimize doğru yol alır ama her nasılsa aradığımız nesneyi görmeyiz; onun orada olduğunun *bilincinde* değilizdir. Derken ansızın onu görüveririz. Aynı görme alanında bulunan bir nesnenin bilincimizde var olduğu ve olmadığı anlar arasında beynimizde ne değişir? Nöral ateşlemenin kendisinde bir değişiklik olmaması dikkat çekicidir; gözlüğü görsek de görmesek de aynı nöronlar ateşlenir. Ama biz gözlüğümüzün farkında değilken nöronların ateşlenmesi eşzamanlı değildir, oysa farkına vardığımız anda senkronize hale gelir.[18] Beynin farklı bölümlerindeki bütün o kuantum uyumlu iyon kanallarının, eşzamanlı bir ateşleme başlatabilmek için birlikte çalışmasını sağlayan EM alan, bilinçsiz ve bilinçli düşünceler arasında bir geçiş rolü oynuyor olabilir.

EM alanlar ya da kuantum uyumlu iyon kanalları gibi fikirlerin bilinci açıklamak için kullanılmasının telepati gibi "paranormal fenomen" denen şeyleri hiçbir biçimde desteklemediğinin özellikle altını çizelim; zira her iki kavram da sadece tek bir beynin *içinde* gerçekleşen nöral süreçleri etkileyebilir, farklı beyinler arasında iletişim sağlayamaz! Penrose'un Gödel argümanı üzerinde dururken işaret ettiğimiz üzere, bu kitabın önceki bölümlerinde ele aldığımız enzim etkisi ya da fotosentezdekinin tersine, bilinci açıklamak için

kuantum mekaniğine ihtiyaç yoktur aslında. Ama yaşamdaki onca kritik fenomene karıştığını gördüğümüz kuantum mekaniğinin, yaşamın en esrarengiz ürünü, bilincin dışında kalması olası mı? Yanıtı okurun takdirine bırakıyoruz. Kuantum uyumlu iyon kanalları ve EM alanları içeren, yukarıda anahatlarıyla çizdiğimiz şema kesinlikle spekülatiftir ama hiç değilse beyinde kuantum dünyasıyla klasik dünya arasında mantıklı bir bağlantı kurmaktadır.

O halde, bunu *aklımızda tutarak* bir kez daha Fransa'nın güneyindeki karanlık mağaraya dönelim ve duvarın önünde duran sanatçımızın gri konturlar üzerinde titreşen meşale alevini seyrederken beyninden eline uzanan olaylar zincirini tamamlayalım. Kayanın üzerine düşen ışık oyunu onun bilinçli aklına bir bizonun imgesini getirir. Bu, onun kafasında belki de beyninin EM alanındaki bir dalgalanmayla somutlaşan, pek çok ayrı nöronun kuantum uyumlu iyon kanallarını açarak eşzamanlı ateşlenmesine neden olan bir fikrin oluşması için yeterlidir. Eşzamanlı sinir sinyalleri beynin her yanında aksiyon potansiyelleri ateşler ve sinaptik bağlantılar yoluyla omurilikten aşağıya inen, sinirler arası kavşaklar üzerinden kol kaslarına bağlı sinir-kas bileşkelerine nörotransmitter paketlerini boşaltacak olan motor sinirlere ulaşan bir sinyal dizisi başlatır. Bu kaslar, kayaya kömürle bir bizon çizmeye hazırlanan eli mağara duvarının üzerinde gezdirirken, onun eşgüdümlü hareket etmesini sağlamak üzere kasılır. Ve daha da önemlisi sanatçımız, bu eylemi bilinçli zihninde oluşan bir fikir *nedeniyle* başlattığını algılar. O bir zombi değildir.

Otuz bin yıl sonra, Jean-Marie Chauvet aynı mağara duvarını fenerinin ışığıyla aydınlatır ve çoktan ölmüş olan sanatçının bir zamanlar beyninde hayat bulmuş olan fikir, bilinçli insan zihninin nöronlarında bir kez daha titreşir.

9
Yaşam nasıl başladı?

. . . eğer (ah! ne kadar da önemli bir eğerdir o!) içinde her çeşit amonyak ve fosforik tuzlar, ışık, ısı, elektrik vs. bulunan, daha da karmaşık değişimler geçirmeye hazır bir protein bileşiğinin kimyasal olarak meydana geldiği, ılık, küçük bir gölcük tasavvur edebilseydik . . .

Charles Darwin, Joseph Hooker'a yazdığı mektup, 1871

GRÖNLAND pek yeşil bir yer değildir aslında.* MS 982 dolaylarında Kızıl Erik olarak bilinen Danimarkalı Viking cinayet suçuyla yargılandığı için İzlanda'dan kaçarken batıya doğru yelken açmış ve adayı keşfetmişti. Ama adayı ilk keşfeden o değildi; MÖ 2500 kadar eski tarihlerde doğu Kanada'dan yola çıkan taş devri insanları da adayı daha önce defalarca keşfetmişti. Ancak Grönland'ın iklim koşulları sert ve amansız olduğundan bu daha eski kültürler, geride belli belirsiz birtakım izler bırakarak silinmiştir. Ortaçağ Ilık Dönemi olarak adlandırılan dönemde adaya ayak basan Erik, koşullar daha ılımlı olduğundan daha iyi idare edeceklerini ummuş, yemyeşil otlaklar hayalinin hemşerilerini batıya çekeceği inancıyla adaya bugünkü adını vermişti. Taktik işe yaramış olmalı ki kısa süre içinde binlerce kişiden oluşan bir koloni oluştu ve en azından

* İngilizcede Greenland, yeşil topraklar anlamına gelir (*ç.n.*)

başlangıçta bu yeni hayata tutunmayı başardı. Ancak ılık dönem sona ererken Grönland, Kuzey Atlantik'in tipik iklim koşullarına geri döndü ve ortadaki buz büyüyerek adanın yüzde 80'ini kapladı. Hava koşullarının giderek sertleşmesiyle ada sakinleri, İskandinav usulü çiftçilik sistemlerini dar kıyı şeridinin sığ topraklarında sürdürmekte zorlandılar ve hem mahsul hem de çiftlik hayvanları azaldı.

Viking kolonisi çökmek üzereyken, bir başka göç dalgasıyla gelen İnuitler (Eskimolar), ironik olarak adanın kuzeyinde, yerel koşullara iyi uyum sağlamış sofistike bir balıkçılık ve avlanma teknolojisiyle hayatını sürdürüyordu. Vikingler, İnuitlerin hayatta kalma stratejilerinden bir şeyler kapabilselerdi kurtulabilirlerdi belki ama iki halk arasında temasa dair elimizdeki tek kayıt, bir Viking yerleşimcisinin, bıçaklanan bir İnuit'in çok kan kaybettiğine dair yorumudur ki bu da Vikinglerin kuzey komşularından bir şeyler öğrenmeye pek de hevesli olmadığının göstergesi olsa gerek. Sonuç olarak, on beşinci yüzyılın sonlarına doğru Viking kolonisi çöktü ve geriye kalan birkaç yerleşimci çareyi yamyamlıkta buldu.

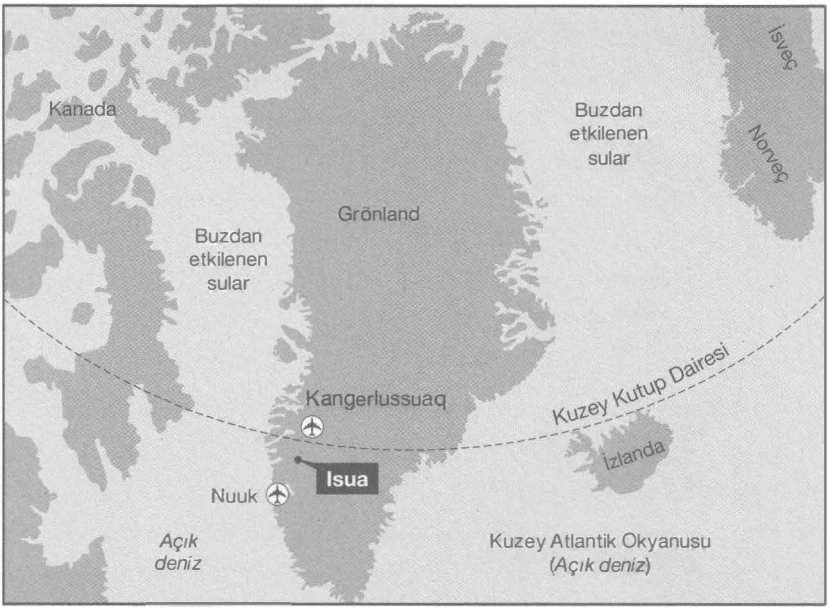
Fakat Danimarkalılar batıdaki ileri karakollarını unutmadılar ve on sekizinci yüzyılın başlarında, yerleşimcilerle olan bağları tazelemek için adaya bir keşif ekibi gönderdiler. Adada terk edilmiş çiftlik evleriyle mezarlardan başka bir şey bulamadılarsa da bu ziyaret, sonunda adanın yerli halkı İnuitlerle birlikte modern Grönland eyaletini kuracak daha başarılı bir koloninin yerleşmesine giden yolu açtı. Günümüzde, köklerini İnuit geleneklerinden alan Grönland ekonomisi büyük ölçüde balıkçılığa dayalı olmakla beraber ada, madenlerinin zenginliğiyle giderek daha fazla tanınmaktadır. 1960'lı yıllarda Grönland'da araştırma yapan Danimarka Jeolojik Araştırma kurumu, adanın başkent Godthaab (şimdiki adıyla Nuuk) yakınındaki güneybatı ucunda coğrafi çalışmalar yapması için Yeni Zelandalı genç jeolog Vic McGregor ile anlaştı.

McGregor, yerel halktan iki kişilik mürettebat, bir de misafirle birlikte kendisinin -eski İnuit kolonicilerin yükünden pek de farklı

olmayan– kamp, avlanma, balık tutma için gereken araç gereçler ve jeoloji ekipmanıyla sıkış tıkış sığabildiği, küçücük, yarı açık bir tekneyle fiyortlarla yarılmış bu bölgede yıllarca dolaştı. Standart stratigrafi tekniklerini kullanarak yaptığı incelemelerde, bölgedeki kayaçların ardışık on katman halinde oluştuğunu, en derindeki en eski katmanın "gerçekten de çok eski", hatta belki üç milyar yıldan bile eski olduğu sonucuna vardı.

1970'lerde McGregor antik kayacından bir örneği, kayaçlarda radyometrik tarihlendirme alanında tanınmış bir bilim insanı olan Stephen Moorbath'ın çalıştığı Oxford laboratuvarına gönderdi. Söz konusu yöntem, radyoaktif izotoplar ile bozunma ürünlerinin oranlarının ölçümüne dayanır. Örneğin, uranyum 238'in yarılanma ömrü 4,5 milyar yıldır (bir dizi nüklid üzerinden sonunda kurşunun kararlı bir izotopuna dönüşür); dolayısıyla dünya yaklaşık dört milyar yaşında olduğuna göre, bir kayaçtaki doğal uranyum konsantrasyonunun yarıya inmesi dünyanın yaşı kadar bir zaman alır. Bilim insanları bir kayaç örneğinde bu izotopların oranını ölçerek, bu kayaçların ne kadar zaman önce oluştuğunu hesaplayabilir. McGregor'ın Grönland'ın güneybatısında Amitsoq adıyla bilinen kıyı bölgesindeki *gnays* denen bir kayaç türünden aldığı örneği analiz etmek için Stephen Moorbath'ın 1970'lerde kullandığı teknikler de bunlardı. Moorbath şaşırtıcı olmakla birlikte gnaysın o güne dek bütün cevher yatakları ya da kayaçlarda bildirilenden daha yüksek oranda kurşun içerdiğini buldu. Kurşun düzeylerinin çok yüksek olması, Amitsoq gnays kayacının, McGregor'ın da tahmin ettiği gibi "gerçekten de çok eski" olduğu anlamına geliyordu; en az 3,7 milyar yaşında, yani o güne dek yeryüzünde bulunmuş bütün kayaçlardan daha eski olmalıydı.

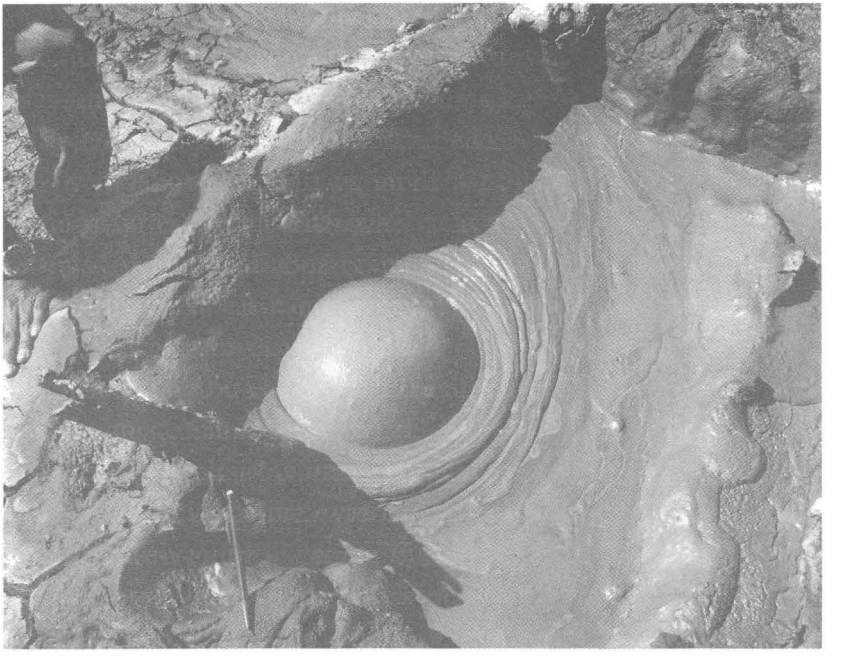
Moorbath bu keşiften öylesine etkilendi ki, daha sonra Grönland'a yapılan keşif gezilerine McGregor'la birlikte katıldı. İki araştırmacı 1971 yılında, adanın denizden uzak iç kısmındaki buz mantosunun kıyısında yer alan keşfedilmemiş Isua bölgesine gitmeye karar verdi (bkz. şekil 9.1). Önce buzdağlarıyla



Şekil 9.1: Isua'nın konumunu gösteren Grönland haritası.

dolu Godthaab Fiyordu'nun başına, Viking yerleşimcilerin orta çağda türlü zorluklara göğüs gererek yaşamaya çalıştıkları yere McGregor'ın minicik teknesiyle gitmeleri gerekti. Havadan yapılan manyetik araştırmaların demir cevherinden zengin olduğunu düşündürdüğü bölgeyle ilgilenen yerel bir madencilik şirketinin helikopteri iki araştırmacıyı oradan alacaktı. Araştırmacılar Isua yeşil şistinde, doğrudan deniz suyuna püskürdüğü için *çamur volkanları* olarak anılan volkanik lavların oluşturduğu, bazaltik yastık lav olarak bilinen yastık biçimli çok sayıda kayaç bulunduğunu gördüler. Yine bu kayaçlar da en az 3,7 milyar yıl öncesine tarihleniyordu. Bu bulgular, dünyanın oluşumundan kısa süre sonra,* sığ deniz diplerindeki hidrotermal bacalardan fokurdayarak püsküren

* Dünyanın 4,5 milyar yıl önce güneşten geriye kalanların yoğuşması sonucu meydana geldiği, katı yerkabuğunun ise ancak bundan yaklaşık yarım milyar yıl sonra oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 9.2: Trinidad'da günümüze ait bir çamur volkanı. Yeryüzünde yaşam ilk olarak benzer bir çamur volkanında fokurdarken, Isua yeşil şistinde izlerini bırakmış olabilir mi? Fotoğraf: Wikipedia Commons vasıtasıyla Michael C. Rygel.

çamur volkanlarını (şekil 9.2) barındıran ılık okyanusların bulunduğunu açıkça göstermekteydi.

Ancak asıl sürpriz, Kopenhag Jeoloji Müzesi'nden araştırmacı Minik Rosing, Isua yeşil şistindeki karbon izotoplarının oranını ölçtüğünde yaşandı. Kayaçlar yüzde 0,4 civarında karbon içerir ve ^{13}C ile ^{12}C izotoplarının nispi oranları ölçüldüğünde, daha az bulunan daha ağır izotop ^{13}C'ün kayaçlardaki miktarının beklenenin çok altında olduğunda bulundu. Karbonun inorganik kaynakları, örneğin atmosferdeki karbondioksit, yüzde 1 civarında ^{13}C içerir, oysa fotosentezde bitkisel ve mikrobiyal kütleye dahil olan izotop tercihen ^{12}C'dir. Dolayısıyla düşük ^{13}C düzeyi genellikle organik maddenin varlığına işaret eder. Bu sonuçlar, Isua çamur volkanlarını saran sıcak sularda 3,7 milyar yıl önce organizmaların yaşadığını

ve bu organizmaların günümüz bitkileri gibi, atmosferdeki ya da suda çözünmüş haldeki karbondioksitin karbonunu tutup bunu hücre yapımı için gereken karbon esaslı bileşiklerin üretiminde kullandığını düşündürmektedir.

Isua kayaçları kuramı hâlâ tartışmalıdır ve bilim insanları düşük ^{13}C düzeylerinin ille de o kadar erken dönemde canlı organizmaların varlığına işaret ettiğini düşünmemektedir. Bu konudaki şüpheciliğin kökeni büyük ölçüde, 3,8 milyar yıl önce "Geç Ağır Bombardıman" olarak bilinen dönemde can çekişen dünyaya çarpan asteroitlerle kuyrukluyıldızlardan kaynaklanan enerjinin, yüzeydeki suyu buharlaştırmaya ve muhtemelen okyanusları steril hale getirmeye yetecek düzeyde olmasına dayanmaktadır. Böylesine eski dönemlerden kalma, fotosentez yapan organizmaların fosillerinin bulunması meseleyi kökünden hallederdi elbette ama Isua kayaçları binyıllar içinde ciddi ölçüde bozulduğu için böyle fosiller olsaydı bile tanınmaz hale gelecekti. Yaşamın varlığının açık kanıtlarını antik mikropların tanınabilir fosillerinde bulabilmek için en az yüz milyonlarca yıl ileri sarmamız gerek.

Kesin kanıtlar bulunmadığı halde pek çok kişi Isua izotop verilerinin dünya üzerinde yaşamın ilk göstergeleri olduğuna inanıyor; Isua çamur volkanları, termal bacalardan püsküren sıcak alkali suları sayesinde yaşamın ortaya çıkması için kesinlikle ideal bir ortam sağlamış olmalı. Bu sular çözünmüş inorganik karbonatlardan zengindi ve gözenekli yapıya sahip yılankavi serpantin kayaçlar, çok az miktardaki organik bileşiklerin yoğunlaşıp kararlı hale geçmesi için her biri elverişli bir mikroçevre oluşturabilecek milyarlarca minik oyukla doluydu. Belki de yaşam gerçekten de Grönland çamurunda yeşerdi. Ama nasıl?

Yapışkan madde sorunu

Bilimde en büyük üç gizemin evrenin başlangıcı, yaşamın başlangıcı ve bilincin başlangıcı olduğu kabul edilir. Kuantum mekaniği

ilkiyle yakından ilişkilidir, üçüncüsüyle olası ilişkisini zaten tartıştık ve az sonra göreceğimiz üzere ikinci gizemi de açıklamaya yardımcı olabilir. Ama öncelikle kuantum dışı açıklamaların yaşamın başlangıcına ilişkin eksiksiz bir izah sunup sunamadığına bakalım.

Yüzyıllar boyu yaşamın kökeni üzerine düşünmüş bilim insanları, filozoflar ve teologlar ilahî yaratılıştan tutun, gezegenimizdeki hayatın tohumlarının uzaydan geldiğini ileri süren *panspermia* teorisine varan çeşitli kuramlar ileri sürmüşlerdir. Daha titiz bir bilimsel yaklaşımın ilk adımları on dokuzuncu yüzyılda, bir çeşit "ılık küçük gölette" gerçekleşen kimyasal süreçlerin canlı maddenin oluşumuyla sonuçlanmış olabileceğini ileri süren Charles Darwin gibi bilim insanları tarafından atılmıştır. Darwin'in spekülasyonları üzerine inşa edilen formel bilimsel kuram Rus bilim insanı Aleksandr Oparin ile İngiliz J. B. S. Haldane tarafından yirminci yüzyılın başında birbirinden ayrı ve bağımsız olarak ileri sürülmüştür ve günümüzde Oparin-Haldane hipotezi olarak bilinmektedir. Her ikisi de, başlangıçta dünya atmosferinin hidrojen, metan ve su buharından zengin olduğunu ve bunların yıldırıma, güneşten gelen ışınlara ya da yanardağlardan kaynaklanan ısı enerjisine maruz kalarak birleşip basit organik bileşiklerden meydana gelen bir karışım oluşturduğunu öne sürmüştür. Bu bileşiklerin zaman içinde ilkel okyanusta birikerek ılık, seyreltik bir organik çorba meydana getirdiğini ve bunun milyonlarca yıl boyunca suyun içinde çalkalandığını, belki de Isua çamur volkanlarının üzerinden aktığını ileri sürmüşlerdir, ta ki bileşimindeki maddeler sonunda şans eseri sıradışı bir özelliği –kendini kopyalayabilme becerisi– olan yeni bir molekül ortaya çıkaracak şekilde bir araya gelene dek.

Haldane ile Oparin bu *ilk replikatör*ün ortaya çıkışının yaşamın başlangıcına götüren kilit olay olduğu görüşünü öne sürmüştür. Yine de bu replikatörün daha sonraki başarısı Darwinci doğal seçilime tabi olmuştur. Çok basit bir varlık olan replikatör kendini kopyalarken pek çok hata ya da mutasyon gelişmiş olsa gerek. Bu mutant replikatörler, daha fazla replikatör yapmak için gereken

kimyasal maddeler için mutant olmayanlarla rekabet etmiştir. En başarılı olanların soyu en fazla sayıda ardıl replikatör oluşturarak devam etmiş, moleküler bir Darwinci doğal seçilim süreci bir replikatör sürüsünü daha yüksek verime ve daha fazla karmaşıklığa yöneltmiştir. Enzimatik olarak kopyalanmayı katalizleyen peptidler gibi aksesuar molekülleri yakalayan replikatörler avantaj kazanmış, hatta bunların bir kısmı, tıpkı günümüz hücrelerinde olduğu gibi, kendilerini dış ortamın aşırılıklarından koruyan yağ yapısındaki zarlarla çevrilerek veziküller (sıvı ya da havayla dolu minik kesecikler) içine hapsolmuştur. Bir kez zarla çevrelendi miydi, hücrenin içi artık kendi biyomoleküllerini yapmak ve bunların dışarı sızmasını önlemek üzere *biyo*kimyasal dönüşümleri –hücre *metabolizmasını*– destekleyebilir hale gelecektir. Kendini içinde bulunduğu ortamdan ayrı tutarken bir yandan da iç ortam koşullarını sağlama ve sürdürme becerisini gösteren ilk canlı hücre artık doğmuştur.

Oparin-Haldane hipotezi, yeryüzünde yaşamın nasıl başlamış olabileceğini anlamamız için bilimsel bir çerçeve sunmuştur. Bununla birlikte hipotez yıllarca sınanmadan öylece bırakılmıştır, ta ki iki Amerikalı kimyager konuya ilgi duyana dek.

1950'li yıllarda Harold Urey seçkin ama fikirleri tartışmalı bir bilim insanıydı. Döteryumun keşfiyle 1934 yılında kimya dalında Nobel Ödülü almıştı; üçüncü bölümden hatırlarsanız, hidrojenin izotopu olan döteryum enzimlerde kinetik izotop etkisinin incelenmesi ve etkinliklerinin kuantum tünellemeyle gerçekleştiğini göstermek için kullanılıyordu. Urey, izotopların saflaştırılması alanındaki uzmanlığı nedeniyle 1941'de, atom bombası geliştirmeye yönelik Manhattan Projesi kapsamındaki uranyum zenginleştirme bölümünün başına getirildi. Ancak Manhattan Projesi'nin amaçları ve gizlilik içinde yürütülmesi Urey'i hayal kırıklığına uğratmıştı. Urey sonraları dönemin ABD Başkanı Harry S. Truman'ı Japonya'ya bomba atmaktan vazgeçirmeye çalıştı. Hiroşima ve Nagazaki'nin ardından Urey popüler bir yayın olan *Collier's* dergisi için, "Ben korkmuş bir adamım" başlıklı, nükleer silahların tehlikelerine karşı uyarı niteliğinde bir

makale yazdı. Chicago Üniversitesi'nde görevliyken McCarthy'nin 1950'li yıllardaki anti-komünist "cadı avı"na karşı çıktı; Başkan Truman'a, casusluk suçuyla yargılanan ve sonunda atom bombasıyla ilgili sırları Sovyetlere verdikleri gerekçesiyle idam edilen Julius ve Ethel Rosenberg'i destekleyen mektuplar yazdı.

Oparin-Haldane hipotezini sınayan diğer Amerikalı kimyager Stanley Miller, 1951 yılında Chicago Üniversitesi'ne doktora öğrencisi olarak başladı; ilk başta "hidrojen bombasının babası" olarak bilinen Edward Teller'ın rehberliğinde, yıldızlardaki element nükleosentezi üzerinde çalışıyordu. Miller'ın hayatı, 1951'de katıldığı, Harold Urey'in Oparin-Haldane senaryosunun olabilirliğini tartıştığı ve birinin deneyleri yapmasını teklif ettiği yaşamın kökeni başlıklı konferansıyla değişti. Konuşmanın etkisi altında kalan Miller, Teller'ın laboratuvarından Urey'inkine transfer oldu ve Urey'i doktora danışmanı olması ve deneyleri yapmasına izin vermesi için ikna etme çabalarına girişti. Urey başlangıçta hevesli öğrencisinin Oparin-Haldane kuramını sınama planlarına şüpheyle yaklaşıyordu. İnorganik kimyasal tepkimelerin saptanabilir düzeyde organik molekül üretebilmesinin milyonlarca yıl sürebileceğini düşünüyordu; oysa Miller'ın doktora programını tamamlamak için sadece üç yılı vardı! Yine de Urey ona ihtiyacı olan mekân ve kaynakları altı ay ila bir yıl süreyle sunmaya hazırdı. Böylece, deneyler bir rota bulamazsa, Miller'ın daha güvenli bir araştırma projesine geçmek için yeterli zamanı olacaktı.

Dünya üzerinden yaşamın başladığı koşulların bir benzerini oluşturmayı amaçlayan Miller, okyanusu taklit etmek amacıyla bir şişeye su doldurdu ve bunun üzerini o zamanlar atmosferde bulunduğunu düşündüğü metan, hidrojen, amonyak gazları ve su buharıyla doldurup ilk atmosferin bir simülasyonunu oluşturdu. Ardından yıldırım simülasyonu için karışımı elektrik kıvılcımlarıyla tutuşturdu. Miller ilkel atmosferini sadece bir hafta süreyle kıvılcımlara maruz bıraktıktan sonra kendisini şaşırtan, bilim dünyasınıysa hayretler içinde bırakan bir sonuçla karşılaştı: Şişede önemli

miktarda amino asit, yani proteinlerin yapıtaşları oluşmuştu. Bu deneyi anlatan makale 1953 yılında *Science* dergisinde yayımlandı;[1] Miller makalenin tek yazarıydı; Urey hayli sıradışı bir tavır sergileyerek, bu keşifle ilgili bütün takdiri hak edenin doktora öğrencisi olduğunda ısrar etmişti.

Urey'in özverili tavrına rağmen günümüzde genellikle Miller-Urey deneyi olarak bilinen ve yaşamın laboratuvar koşullarında yaratılmasının ilk adımı olarak göklere çıkarılan bu deney biyolojinin dönüm noktalarından biridir. Her ne kadar kendi kendini kopyalayabilen moleküller oluşmadıysa da, Miller'ın "ilkel" çorbasındaki amino asitlerin polimerize olarak peptidleri, kompleks proteinleri, yeterli zaman tanınması ve yeterince büyük bir okyanusta bulunması koşuluyla nihayetinde Oparin-Haldane replikatörlerini meydana getireceği düşünüldü.

1950'lerden bu yana Miller-Urey deneyi birçok bilim insanı tarafından, farklı kimyasal ve gaz karışımları, farklı enerji kaynakları kullanılarak defalarca tekrarlandı ve bu deneylerde sadece amino asitler değil, şekerler, hatta az miktarda nükleik asitler meydana geldi. Yine de geriye dönüp baktığımızda yarım asrı aşkın süre sonra, laboratuvarda yaratılmış bir ilkel çorbada hâlâ Oparin-Haldane replikatörleri oluşturabilmiş değiliz. Bunun nedenini anlayabilmek için Miller'ın deneylerine daha yakından bakmalıyız.

İlk sorun, Miller'ın oluşturduğu kimyasal karışımın karmaşıklığıdır. Üretilen organik maddenin büyük bölümü, kompleks kimyasal sentez işlemleri sıkı biçimde kontrol edilmediği ve pek çok yanlış ürün meydana geldiğinde benzer maddelerle karşılaşan organik kimyacıların yakından tanıdığı karmaşık bir katran formundaydı. Aslına bakarsanız, mutfağınızın rahat ortamında da ocaktaki yemeği yakarak benzer bir katran elde edebilirsiniz. Tencerenin dibine yapışan, temizlenmesi zor siyahımsı kahverengi yapışkan maddenin bileşimi Miller'ın katranınkiyle hayli benzerdir. Bu gibi kimyasal karışımlarda sorun, bu katran benzeri yapışkan maddeden daha fazlasını elde etmenin son derece zor olmasıdır. Kimyasal terimlerle

ifade edecek olursak, bu maddeler "verimli" değildir çünkü çok karmaşıktır ve belirli bir kimyasal, mesela bir amino asit, öylesine çok sayıda farklı bileşikle tepkimeye girme eğilimi gösterir ki ilgisiz kimyasal tepkimeler ormanında kaybolur gider. Milyonlarca aşçı ve binlerce kimya öğrencisi yüzyıllardır bu tür organik yapışkan maddeler üretmektedir ve şimdiye dek ellerine temizlenmesi zor bulaşıktan fazlası geçmemiştir.

Yapışkan maddeden hücrelere

Dünyadaki bütün dibi tutmuş tencerelerin dibindeki yapışkan maddeyi kazıyıp, sonra da bu trilyonlarca kompleks organik molekülü okyanus büyüklüğünde bir su kütlesinde çözerek bir ilkel çorba hazırladığınızı düşünün. Şimdi de ortama enerji kaynağı olarak birkaç Grönland çamur volkanı ve belki biraz da yıldırım ekleyip karıştırın. Sizce yaşam yaratabilmek için çorbayı ne kadar süre karıştırmanız gerekir? Bir milyon yıl mı? Yüz milyon yıl mı? Yüz *milyar* yıl mı?

En basit yaşam formu bile tıpkı bu kimyasal yapışkan gibi olağanüstü karmaşıktır. Ancak yapışkan maddenin tersine yüksek düzeyde organizedir. Yapışkan maddeyi organize yaşam oluşturmak için başlangıç malzemesi olarak kullanmadaki sorun, ilkel yerküre koşullarındaki rastgele termodinamik güçlerin –ikinci bölümde gördüğümüz bilardo topu benzeri moleküler hareketlerin– düzeni yaratmaktan çok, yok etme eğilimi göstermesidir. Tencereye tavuk koyar, pişirir, karıştırır, tavuk çorbası yaparsınız. Ama bugüne kadar tencereye çorba koyup da tavuk yapabilen olmamıştır.

Tabii ki, yaşam tavuklar (ya da yumurtalar) ile başlamadı. Günümüzde yaşayan en basit kendi kendini kopyalayabilen canlılar, bir kuştan çok daha basit yapıda olan bakterilerdir.* En basit bakteri mikoplazmadır (Craig Venter'in sentetik yaşam deneyinde

* Kendilerini ancak canlı bir hücrenin yardımıyla kopyalayabilen virüsler bunun dışındadır.

kullandığı bakteri); ancak bu canlılar bile aslında son derece karmaşık yaşam formlarıdır. Genomları beş yüze yakın gen içerir ve buna yakın sayıda karmaşık proteinler üretir; enzim işlevi gören bu proteinler her biri arabanızın motorundan çok daha girift olan lipitlerin, şekerlerin, DNA ve RNA'nın, hücre zarı, kromozom ve binlerce başka yapının yapımında kullanılır. Oysa gerçekte mikoplazma kendi başına yaşayamayan, ihtiyaç duyduğu biyomoleküllerin çoğunu konaktan temin eden bir bakteriyel muhallebi çocuğudur; bir parazittir o ve gerçek hayatta bir ilkel çorbada yaşamış olması mümkün değildir. Daha olası bir aday, fotosentez yoluyla kendi biyokimyasallarını üretebilen tek hücreli organizmalar olan siyanobakterilerdir. Şayet siyanobakteriler ilkel yerküre koşullarında var oldularsa, Grönland'ın 3,7 milyar yaşındaki Isua kayaçlarında saptanan ^{13}C'un kaynağı olabilirler. Ancak genomu *iki bine* yakın gen kodlayan bu bakteri, mikoplazmaya göre çok daha karmaşıktır. Bir siyanobakteri yapabilmek için ilkel çorba okyanusunu ne kadar süreyle karıştırmanız gerekir acaba?

"Büyük Patlama" terimini bulan İngiliz gökbilimci Sir Fred Hoyle hayatı boyunca yaşamın kökenlerine ilgi duymuştur. Kimyasal süreçlerin rastgele bir araya gelmesi sonucu yaşamın başlaması olasılığının, bir çöplüğün üzerinden esen kasırganın şans eseri bir jumbo jet yapması kadar düşük olduğunu söylemiştir. Hoyle'un bu denli çarpıcı bir ifadeyle dile getirdiği mesele, bildiğimiz şekliyle hücresel yaşamın şans eseri ortaya çıkamayacak kadar karmaşık ve organize olmasıdır; öncesinde mutlaka daha basit kendi kendini kopyalayıcılar ("self-replicator") ortaya çıkmış olmalıdır.

RNA dünyası

Peki bu kendi kendini kopyalayıcılar neye benziyordu? Ve nasıl çalışıyorlardı? Kendilerinden sonra gelen daha başarılı kopyalayıcılarla rekabet sonucu soyları tükendiğinden olsa gerek günümüzde bir örneği bulunmadığından, varsayılan yapıları büyük oranda

bildiklerimize dayanan tahminlerle sınırlı. Yaklaşımlardan biri, günümüzde yaşayan en basit yaşam formlarından geriye doğru çıkarımda bulunarak gitmek ve milyarlarca yıl önce yeryüzünde yaşamın öncüsü olabilecek çok daha basit bir kendi kendini kopyalayıcıyı, fazlalıkları atılmış, en basit bir tür bakteriyi hayal etmektir.

Sorun şu ki, daha basit kendi kendini kopyalayıcıları canlı hücrelerden ayırıp incelemek mümkün değildir çünkü hücre bileşenlerinden hiçbiri kendi kendini kopyalama becerisine sahip değildir. DNA'dan oluşan genler kendi kendini kopyalamaz, bu işi DNA polimeraz enzimleri yapar. Buna karşılık bu enzimler de kendilerini kopyalamaz çünkü öncelikle DNA ve RNA ipliklerinde şifrelenmeleri gerekir.

RNA bu bölümde önemli rol oynayacağı için ne olduğunu ve ne işe yaradığını hatırlamakta fayda var. RNA, DNA'nın daha basit yapılı kimyasal kuzenidir ve DNA'nın çift sarmal yapısına karşılık RNA tek iplikli bir sarmaldır. Bu farklılığa rağmen RNA'nın genetik bilgi şifreleme kapasitesi, şöhreti daha büyük kuzenininkiyle az çok aynıdır; sadece bu bilginin tamamlayıcı kopyasına sahip değildir. Tıpkı DNA'da olduğu gibi RNA'nın da taşıdığı genetik şifre dört farklı genetik harfle yazılır, böylece genler RNA'da da aynı DNA'da olduğu gibi şifrelenebilir. Hatta grip virüsü gibi pek çok virüsün genomu DNA değil RNA yapısındadır. Ancak bakteriler, hayvan ya da bitki hücreleri gibi canlı hücrelerde RNA, DNA'dan apayrı bir rol üstlenir: DNA'da yazılı olan genetik bilgi, yedinci bölümde gördüğümüz gen okuma sürecinde önce RNA'ya kopyalanır. Görece büyük ve hareketsiz DNA molekülünün tersine daha kısa olan RNA iplikleri hücre içinde serbestçe dolaşabildikleri için kromozomlardaki genlerden aldıkları mesajları protein sentez mekanizmasına taşıyabilirler. Burada RNA dizisi okunur ve enzimler gibi proteinleri oluşturan amino asit dizilerine çevrilir. O halde en azından günümüz hücrelerinde RNA, DNA'daki genomik şifre ile hücrelerimizin diğer bütün bileşenlerinin oluşmasında rol oynayan proteinler arasında kilit öneme sahip bir aracıdır.

Yaşamın kökeni problemimize geri dönecek olursak, nasıl ki bir kadın (birazcık "yardımla") kendini kopyalayabildiği halde, kalbi ya da karaciğeri bunu yapamıyorsa, hücre de bir bütün olarak kendi kendini kopyalayan bir varlık olmasına rağmen, bileşenleri öyle değildir. Bu durum, günümüzün karmaşık hücresel yaşamından geriye, onun hücre olmayan çok daha basit yapıdaki atasına doğru çıkarımda bulunmaya çalışırken sorun yaratır. Başka bir deyişle soru "Önce hangisi oluştu? Gendeki DNA mı, RNA mı, yoksa enzim mi? Eğer DNA ya da RNA ise, onları yapan neydi? Eğer enzimse, onu kim kodladı?" şekline dönüşür.

Bu soruna olası bir çözüm getiren kişi, 1982 yılında bazı RNA moleküllerinin genetik bilgi şifrelemenin dışında, tepkimeleri katalizlemek üzere enzimlerin işini de yapabildiğini bulan Amerikalı biyokimyager Thomas Cech olmuştur (bu çalışmasıyla 1989'da kimya dalında Nobel Ödülü'nü Sidney Altman ile paylaşmıştır). *Ribozimler* olarak bilinen bu moleküllerin ilk örnekleri, tatlı su gölcüklerinde yaşayan bir protozoon türü, yani tek hücreli minicik organizmalar olan *Tetrahymena* genlerinde bulunmuştur ama o zamandan bu yana ribozimlerin bütün canlı hücrelerde rolü olduğu saptanmıştır. Ribozimlerin keşfi çok geçmeden yaşamın kökeniyle ilgili "tavuk mu yumurtadan, yumurta mı tavuktan" açmazından kurtulmanın bir yolu olarak benimsendi. *RNA dünyası hipotezi* adıyla bilinen varsayım, ilkel kimyasal sentezin, ilkel çorbada bulunan biyokimyasalları kullanarak, hem gen hem de enzim olarak davranabilen ve böylece hem kendi yapısını şifreleyen (DNA gibi) hem de kendi kopyalarını yapabilen (enzimler gibi) bir RNA molekülünün oluşumuyla sonuçlandığını ileri sürer. Bu kopyalama işlemi başlangıçta gayet gelişigüzel seyrettiğinden, daha önce canlandırdığımız moleküler Darwinci rekabet ortamında birbiriyle rekabet eden çok sayıda mutant versiyonun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Zaman içinde bu RNA kopyalayıcılar, kopyalama verimini artırmak için birtakım proteinleri bir araya toplayarak DNA'yı ve nihayet ilk canlı hücreyi meydana getirmiştir.

Kendini kopyalayabilen RNA moleküllerinin DNA'dan ve hücrelerden önce ortaya çıkmış olduğu görüşü yaşamın kökeni araştırmalarında artık neredeyse bir dogmadır. Ribozimlerin, kendi kendini kopyalayabilen bir molekülden beklenen bütün temel tepkimeleri gerçekleştirebildiği gösterilmiştir. Örneğin, bir ribozim sınıfı iki RNA molekülünü birleştirebilirken, bir başkası onları ayırabilir. Bir diğer ribozim türüyse kısa (bir avuç dolusu bazdan oluşan) RNA ipliklerini kopyalayabilir. Bu basit eylemlerden yola çıkarak, kendi kendini kopyalama için gereken bütün bir tepkimeler grubunu katalizleyebilen daha karmaşık bir ribozim hayal edebiliriz. Kendini kopyalama bir kez devreye girdikten sonra, doğal seçilim de işlemeye başlar; dolayısıyla RNA dünyası, sonunda ilk canlı hücrenin oluşumuna varan rekabetçi bir yola adım atar, en azından genel kanı budur.

Ancak bu senaryoda birtakım sorunlar var. Basit biyokimyasal tepkimeler ribozimler tarafından katalizlenebilirse de, bir ribozimin kendi kendini kopyalaması, ribozimin kendi bazlarına ait dizi-yi tanıması, içinde bulunduğu ortamdaki özdeş kimyasalların belirlenmesi ve bir kopyasını oluşturmak üzere bu kimyasalların doğru sırayla bir araya getirilmesini içeren çok daha karmaşık bir süreçtir. Doğru biyokimyasallarla dolu hücrelerde bulunma lüksüne sahip proteinler için dahi çok zor bir iş bu; dolayısıyla ribozimlerin, karman çorman ve yapış yapış ilkel çorbanın içinde bunu nasıl başarabildiğini anlamak daha da zor. Bugüne kadar, laboratuvar koşullarında dahi olsa, böylesine karmaşık bir işi gerçekleştirebilen bir ribozim bulan ya da yapan olmadı.

Ayrıca ilkel çorbada RNA moleküllerinin kendinin nasıl ortaya çıktığı gibi daha temel bir sorun var. Molekül üç parçadan oluşur: kendi genetik bilgisini şifreleyen RNA bazı (tıpkı DNA bazlarının DNA'daki genetik bilgiyi şifrelemesi gibi), bir fosfat grubu ve riboz denen bir şeker. İlkel çorbada RNA bazları ile fosfat bileşenlerini oluşturmuş olabilecek birtakım akla yakın kimyasal tepkimeler bir yere kadar başarıyla tasarlanmışsa da, riboz açığa çıkaran

en güvenilir tepkimede bir yığın başka şeker de oluşmuştur. Riboz şekerinin kendi başına oluşabildiği, biyolojik olmayan bir mekanizma bilinmiyor. Ayrıca riboz şekeri yapılabilse bile, üç bileşeni doğru biçimde bir araya getirmek başlı başına bir iştir. RNA'nın üç bileşeninin olası biçimleri bir araya getirildiğinde, bunlar rastgele yollardan birleşerek kaçınılmaz şekilde ilkel yapışkanı meydana getirir. Kimyagerler bu sorunun önüne geçmek için, kimyasal grupları bu tür istenmeyen tepkimeleri engelleyecek şekilde değiştirilmiş özel bazlar kullanır ama bu hile yapmak demektir ve her halükârda "aktifleştirilmiş" bazların ilkel koşullarda oluşma ihtimali, baştaki RNA bazlarınınkinden bile düşüktür.

Buna karşılık kimyagerler, istenen ürün bir tepkimede elde edilince bir sonraki tepkimeye geçmeden önce o ürünün izole edilip saflaştırıldığı, çok karmaşık ve dikkatle denetlenen bir dizi tepkimeyle, basit kimyasallardan RNA bazları sentezleyebilmektedir. İskoç kimyager Graham Cairns-Smith, ilkel çorbada bulunması olası basit organik bileşiklerden bir RNA bazı sentezlemek için yaklaşık 140 aşama gerektiğini tahmin etmiştir.[2] Her aşamada, önüne geçilmesi gereken en az altı civarında alternatif tepkime vardır. Kimyasal sentezi gözünüzde canlandırmak için her molekülü altı yüzlü bir moleküler zar olarak düşünün; her aşama, altı sayısının doğru ürünü, diğerlerininse yanlış ürünü gösterdiği bir atışa karşılık gelir. Yani bir başlatıcı molekülün sonunda RNA'ya dönüşme ihtimali peş peşe 140 kez altı atmaya eşdeğerdir.

Kimyagerler elbette ki bu hayret verici derecede düşük olasılıkları, her basamağı dikkatle kontrol ederek düzeltirler; oysa canlılığın başlangıcından önceki dünyada her şey sadece şansa dayanıyordu. Belki de güneş tam zamanında yüzünü gösterip bir çamur volkanının etrafındaki küçük kimyasallar havuzunu doğru anda buharlaştırdı. Ya da belki çamur volkanı püskürünce ortama eklediği su ve birazcık da kükürtle bambaşka bir bileşik grubu yarattı. Belki de gök gürültülü sağanak yağış karışımı biraz daha çalkalayıp, biraz da elektrik enerjisi ekleyerek birkaç kimyasal değişikliği hızlandırdı.

Bu liste böyle uzar gider ama sadece şansa bel bağlandığında, 140 aşamanın her birinde altı olası üründen doğru olanın açığa çıkma olasılığını hesaplamak kolaydır: 6^{140}'ta bir (kabaca 10^{109}'da bir). İstatistiksel olarak salt rastlantısal süreçlerle RNA yapabilme şansını yakalamak için ilkel çorbanızda en az bu sayıda başlangıç molekülünüz olmalı. Ancak 10^{109} görünür evrenin bütünündeki temel parçacıkların sayısından (yaklaşık 10^{80}) bile çok daha büyük bir sayıdır. Yaşamın başlangıcını Isua kayaçlarının bize düşündürdüğü dönem olarak kabul edersek dünyanın, kendi oluşumuyla yaşamın başlangıcı arasında geçen milyonlarca yıl içinde anlamlı miktarda RNA yapmaya yetecek ne zamanı vardı ne de o kadar çok molekülü.

Yine de farz edelim ki henüz keşfedilmemiş bir kimyasal süreçle o dönemde anlamlı miktarda RNA sentezi *oldu*. Şimdi de aynı derecede cesaret kırıcı bir başka sorunu, dört farklı RNA bazını (hatırlarsanız DNA şifresindeki dört harfin, yani A, G, C ve T'nin eşdeğeriydi bunlar) doğru sırada dizip kendi kendini kopyalama özelliğine sahip bir ribozim yapma problemini aşmamız gerekiyor. Ribozimlerin çoğu en az yüz baz uzunluğunda RNA iplikleridir. İpliğin üzerindeki her konumda dört bazdan biri bulunmak zorunda olduğuna göre, 100 baz uzunluğunda bir RNA ipliğini 4^{100} (ya da 10^{60}) farklı biçimde bir araya getirebilirsiniz demektir. RNA bazlarının rastgele bir araya gelmesi sonucu, kendi kendini kopyalayabilen bir ribozim yapmak için gereken doğru dizilimi elde etme ihtimali nedir dersiniz?

Büyük sayılarla epey eğlendiğimize göre bunu da hesaplayabiliriz. Yüz baz uzunluğunda RNA ipliklerinden 4^{100} tanesinin toplam kütlesi 10^{50} kilogramdır. Yani çoğu ipliğin tek bir kopyasını elde etmek ve bunlardan birinde bütün bazların, kendi kendini kopyalayıcı bir molekül oluşturmak üzere doğru biçimde düzenlenmesi için makul bir şans yakalamak istiyorsak, ihtiyacımız olan miktar budur. Gelgelelim, Samanyolu galaksisinin toplam kütlesinin 10^{42} kilogram civarında olduğu düşünülüyor.

Açıkça görülüyor ki, işi şansa bırakamayız.

Yüz baz uzunluğunda olası 4^{100} tane RNA ipliği içinde kendi kendini kopyalayıcı gibi davranan tek bir düzenleme olmak zorunda değil elbette. Çok daha fazlası olabilir. Yüz baz uzunluğundaki RNA ipliklerinden trilyonlarca olası kopyalayıcı çıkabilir. Belki de kendi kendini kopyalayan RNA aslında oldukça yaygındır ve bir kendi kendini kopyalayıcı oluşturma şansını elde etmek için yalnızca bir milyon moleküle ihtiyacımız vardır. Bu argümanın sorunu, bunun bir argümandan ibaret olmasıdır. Onca çabaya rağmen bugüne dek hiç kimse kendi kendini kopyalayan bir RNA (ya da DNA veya protein) yapamamış veya doğada böyle bir molekül saptayamamıştır. Kendi kendini kopyalamanın ne denli çetin bir iş olduğunu düşündüğünüzde bu hiç de şaşırtıcı gelmez. Günümüz dünyasında bunu ancak bütün, canlı bir hücre yapabilir. Aynı işi çok daha basit bir sistem milyarlarca yıl önce yapmış olabilir mi? Öyle olsa gerek, aksi takdirde bugün bu sorun üzerinde düşünüp taşınıyor olmazdık. Ancak hücreler ortaya çıkmadan önce bunun nasıl başarıldığı henüz açıklık kazanmamıştır.

Biyolojik kendi kendini kopyalayıcıları belirlemenin güçlükleri düşünüldüğünde, daha genel bir soruyla durumu kavrayabiliriz: kendi kendini kopyalama herhangi bir sistemde ne kadar basit olabilir? Modern teknoloji bize, fotokopi makinelerinden bilgisayarlara ve 3 boyutlu yazıcılara, şunu bunu kopyalayabilen pek çok cihaz sunmakta. Bu cihazlardan biri kendi kopyasını yapabilir mi? Buna en fazla yaklaşan cihaz, Birleşik Krallık'taki Bath Üniversitesi'nden Adrian Bowyer'ın parlak buluşu olan RepRap (*Replicating Rapid prototyper*'ın kısaltması) gibi bir 3 boyutlu yazıcı olsa gerek. Bu makineler kendi bileşenlerini oluşturabilir ve bunlar da bir araya getirilerek bir başka RepRap 3 boyutlu yazıcı yapılabilir.

Pek öyle değil aslında. Makine sadece plastik parçaları basar ama kendi iskeleti ve elektrikli bileşenlerinin çoğu metaldir. O halde kopyalayabildiği kısımlar sadece plastik parçalarıdır ve bunların da yeni bir yazıcı yapmak için diğer parçalarla birlikte elle bir araya getirilmesi gerekir. Tasarımcıların hayali, herkesin faydalanabileceği

kendi kendi kopyalayabilen RepRap yazıcılar üretmek (birçok alternatif tasarım mevcut). Ancak şu anda, gerçek anlamda kendi kendini kopyalayabilen bir makine yapmanın henüz çok uzağındayız.

Kendi kendini kopyalayan makineler bu işlemin ne denli kolay ya da zor olduğunu anlamamıza pek yardımcı olmadığına göre, madde dünyasını bir kenara bırakıp bu sorunun yanıtını o karman çorman ve yapımı zor kimyasalların yerini dijital dünyanın basit yapıtaşlarının, değeri ya 0 ya da 1 olabilen bitlerin aldığı bir bilgisayarın içinde arayabilir miyiz? Sekiz bitten oluşan bir "bayt"lık veri, bilgisayar kodunda metindeki tek bir karakteri temsil eder ve kabaca genetik şifre birimine –DNA ya da RNA bazı– eşdeğer olduğu söylenebilir. Artık şunu sorabiliriz: Bir bilgisayardaki bütün olası bayt iplikleri arasında, kendi kendini kopyalayabilenler ne kadar yaygındır?

Bu noktada büyük bir avantaj elde ettik çünkü kendi kendini kopyalayabilen bayt iplikleri bayağı yaygındır; onları bilgisayar virüsleri olarak biliyoruz. Bunlar merkezi işlem birimini (CPU) kandırarak bilgisayarlarımıza bulaşan ve çok sayıda kopyasını üreten görece kısa bilgisayar programlarıdır. Bu bilgisayar virüsleri daha sonra elektronik postamıza atlayıp oradan arkadaşlarımızın ve meslektaşlarımızın bilgisayarlarına da bulaşır. O halde bilgisayarın belleğini bir tür dijital ilkel çorba olarak kabul edersek, bilgisayar virüslerini de ilkel kendi kendini kopyalayıcıların dijital eşdeğeri olarak düşünebiliriz.

En basit bilgisayar virüslerinden biri olan Tinba, çoğu bilgisayar programına göre çok daha kısa olup sadece 20 kilobayt uzunluğundadır. Buna rağmen Tinba 2012 yılında büyük bankaların bilgisayarlarına başarıyla saldırmış, internet tarayıcılarına girmiş, "login" verilerini çalmıştır; dolayısıyla korkunç bir kendi kendini kopyalayıcı olduğu ortadadır. Her ne kadar 20 kilobayt bir bilgisayar programı için fazlasıyla kısaysa da, görece uzun bir dijital bilgi ipliğinden oluşur, zira bir bayt 8 bite eşit olduğuna göre, 160.000 bitlik bilgiye karşılık gelir. Her bit iki durumdan birinde (0 ya da 1) bulunabildiğine göre, ikili sayma sistemine göre belirli ipliklerin

rastgele oluşma olasılığını hesaplayabiliriz. Örneğin, üç bitlik belirli bir ipliğin, diyelim ki 111'in, oluşma şansı ½ × ½ × ½, yani 2^3'te birdir. Aynı matematiksel mantığı izlersek, Tinba gibi 160.000 bit uzunluğunda belli bir ipliğe es kaza ulaşma şansımız $2^{160.000}$'de 1'dir. Bu akla durgunluk verecek derecede küçük bir sayıdır ve bize Tinba'nın şans eseri ortaya çıkmış olamayacağını gösterir.

Belki de RNA molekülleri için varsaydığımız gibi, Tinba'dan çok daha basit, şans eseri ortaya çıkmış olabilecek çok sayıda kendi kendini kopyalayıcı kod vardır. Ama durum gerçekten buysa, o zaman internetten saniyede akan zilyonlarca gigabaytlık bilgisayar kodundan şimdiye kadar bir bilgisayar virüsünün kendiliğinden oluşması gerekirdi. Sonuçta bu kodların çoğu bir ve sıfır dizilerinden ibaret (her saniye indirilen görüntüleri ve filmleri bir düşünün). Bu kodların hepsi CPU'larımıza kopyalama ya da silme gibi basit operasyonlara ilişkin temel yönergeleri verme açısından potansiyel olarak işlevseldir; bununla beraber bugüne kadar bilgisayarlara bulaşmış bütün virüsler insan tasarımından başkasını düşündürmeyen işaretler taşır. Bildiğimiz kadarıyla, bütün dünyada her gün akan dijital bilgi nehri asla kendiliğinden bir bilgisayar virüsü yaratmamıştır. Kendi kendini kopyalama işlemi, bilgisayarın kopyalama-dostu ortamında dahi zordur ve bilindiği kadarıyla şimdiye dek bir kez olsun kendiliğinden gerçekleşmemiştir.

Öyleyse kuantum mekaniği yardım edebilir mi?

Dijital dünyaya yaptığımız bu kısa yolculuk, yaşamın kökeniyle ilgili arayışımızdaki esas sorunu açığa çıkarır: kendi kendini kopyalayan bir molekül oluşturmak için gereken malzemeleri doğru konfigürasyonda bir araya getirmekte kullanılan arama motorunun doğasını. İlkel çorbada hangi kimyasallar bulunursa bulunsun, bunların, son derece nadir rastlanan bir kendi kendini kopyalayıcıya denk gelebilmek için muazzam bir olasılıklar denizinde arayışa çıkmış olması gerekir. Sorunumuz, arayışımızı klasik dünyanın rutin

kurallarıyla sınırlamamız olabilir mi acaba? Dördüncü bölümden hatırlarsanız, MIT'deki kuantum kuramcıları, *New York Times*'ta, bitkilerle mikropların bir kuantum arama rutini uyguladığını söyleyen makale karşısında başlangıçta son derede kuşkucu davranmışlardı. Ama sonunda, fotosentetik sistemlerin gerçekten de kuantum yürüyüş olarak adlandırılan bir kuantum arama stratejisi uyguladığı fikrini kabul etmişlerdi. Biz dahil[3] pek çok araştırmacı yaşamın kökeninin de benzer şekilde bir tür kuantum arama senaryosuyla bağlantılı olabileceği fikrini incelemiştir.

Üç buçuk milyar yıl önce, Grönland'ın gnays tabakaları oluştuğu sırada, Isua denizinin dibindeki bir çamur volkanından sızan serpantin kayalardan birindeki küçücük bir delikte göllenen minicik bir su birikintisi düşünün. İşte size Darwin'in "içinde her çeşit amonyak ve fosforik tuzlar, ışık, ısı, elektrik vs. bulunan", "daha da karmaşık değişimler geçirmeye hazır bir protein bileşiğinin" meydana gelmiş olabileceği ılık, küçük bir gölcük. Şimdi bir adım daha ileri gidip, Stanley Miller'ın keşfettiği türde kimyasal süreçlerce yapılmış bir "protein bileşiği"nin (aynı şekilde bir RNA molekülü de olabilirdi) enzim etkinliği gösteren ama henüz kendi kendini kopyalayamayan bir ön-enzim (ya da ribozim) olduğunu hayal edelim. Dahası, bu enzimdeki kimi parçacıkların farklı konumlara hareket edebildiğini ama klasik enerji bariyerlerinin bunun önüne geçtiğini varsayalım. Ancak üçüncü bölümde gördüğümüz gibi, gerek elektronlar gerekse protonlar enerji bariyerlerinden, klasik aktarıma gerek duymaksızın, enzim etkisi için kritik bir özellik olan kuantum tünelleme yoluyla geçebilir. Pratikte, elektron ya da proton engelin her iki tarafında da eşzamanlı olarak bulunur. Bunun ön-enzimlerimizde de gerçekleştiğini düşünürsek, farklı konfigürasyonların -parçacığı enerji engelinin o ya da bu yanında bulmamız- farklı enzim etkinlikleri, yani farklı kimyasal tepkime türlerini hızlandırma becerileriyle ilişkili olmasını bekleyebiliriz ve bunlardan biri de kendi kendini kopyalama tepkimesidir belki.

Hesap kolay olsun diye, hayalî ön-enzimimizde, her biri iki farklı konumdan birine kuantum tünelleme yapabilen toplam 64 proton ve elektron olduğunu varsayalım. Hayalî ön-enzimimiz için söz konusu olabilecek toplam yapısal varyasyon miktarı yine de muazzamdır: 2^{64} olası konfigürasyon, yani hayli büyük bir sayı. Diyelim ki bu konfigürasyonlardan sadece biri, kendi kendini kopyalayabilen bir enzim için gerekli bütün özelliklere sahip. Sorumuz şu: Yaşamın ortaya çıkışına yol açacak o belirli konfigürasyonu bulmak ne kadar kolay? Kendi kendini kopyalayan bu molekül, küçük, ılık gölcüğümüzde hiç oluşacak mı?

İlk ön-enzimi süperpozisyon ya da tünelleme gibi kuantum numaralarına başvurmayan klasik bir molekül olarak düşünün. Bu molekül herhangi bir anda 2^{64} farklı konfigürasyondan sadece birinde bulunabilir ve bu ön-enzimin bir kendi kendini kopyalayıcı olma ihtimali 2^{64}'te 1'dir, yani şans inanılmaz derecede düşüktür. Büyük olasılıkla klasik ön-enzim, kendi kendini kopyalayamayan o sıkıcı konfigürasyonlardan birine takılıp kalacaktır.

Moleküller genel termodinamik yıpranmadan ötürü değişir elbette, ancak klasik dünyada böyle bir değişim görece yavaştır. Bir molekülün değişmesi için, atomların ilk düzenlemesi tamamen parçalanmalı ve bileşen parçacıklar yeni bir moleküler konfigürasyon oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmelidir. Üçüncü bölümde uzun ömürlü dinozor kollajeninde gördüğümüz gibi, kimyasal değişiklikler bazen jeolojik zaman ölçeklerinde gerçekleşebilir. Klasik olduğunu düşündüğümüz ön-enzimimizin, 2^{64} konfigürasyonun küçücük bir bölümünü dahi araştırması çok uzun zaman alacaktır.

Buna karşılık, ön-enzimdeki 64 kilit parçacığın, alternatif konumlar arasında tünelleme yapabilen elektronlar ve protonlardan oluştuğunu düşündüğümüzde durum kökten değişir.

Ön-enzim, bir kuantum sistem olarak, kuantum süperpozisyon durumundayken aynı anda olası bütün konfigürasyonlarda bulunabilir. Bu durumda 64 sayısını seçmemizin nedeni açıklık kazanıyor:

sekizinci bölümde kuantum hesaplamanın gücünü göstermek için Çin imparatorunun satranç gafını örnek olarak verirken karşılaştığımız sayıydı bu; satranç tahtasındaki karelerin ya da kübitlerin rolünü bu kez tünelleme yapan parçacıklar alıyor. kendi kendini kopyalayan ön-enzimimiz, yeterince uzun süre hayatta kalabilseydi, 64 kübitlik bir kuantum bilgisayarı gibi davranabilirdi ve böyle bir cihazın ne denli güçlü olabileceğini zaten gördük. O zaman belki de şu soruyu yanıtlamak için muazzam kuantum hesaplama kaynaklarını kullanabilirdi: Kendi kendini kopyalayıcı için doğru moleküler konfigürasyon nedir? Bu şekilde ifade edince problem ve olası çözümü biraz daha berraklaşıyor. Ön-enzimi böyle bir kuantum süperpozisyon halinde düşündüğünüz zaman, olası 2^{64} yapının içinde kendi kendini kopyalayanı arama problemi çözülebilir hale gelir.

Yine de bir terslik var. Hatırlarsanız kübitlerin kuantum hesaplama yapabilmek için uyumlu ve dolanık kalması gerekiyordu. Uyumsuzluk geliştiği anda 2^{64} farklı durumun süperpozisyonu çöker ve geriye sadece biri kalır. Bunun bir faydası olur mu? Görünüşe bakılırsa olmaz çünkü kuantum süperpozisyonun kendi kendini kopyalayan tek bir duruma çökmesi bizi başa döndürür: $1/2^{64}$ gibi cüzi bir orana, yani peş peşe 64 kez tura atma şansına. Ancak bir sonraki aşamada, kuantum tanım klasik karşılığından ayrılır.

Eğer bir molekül kuantum mekaniğine uygun davranmıyorsa ve kendi kendini kopyalayamayan yanlış bir atom düzenlenmesinin içinde buluyorsa –ki böyle olacağı neredeyse kesindir– farklı bir konfigürasyon denemek, moleküler bağların jeolojik düzeyde yavaş bir sökümünü ve yeniden düzenlenmesini gerektirecektir. Fakat eşdeğer kuantum molekülün uyumsuzluğundan sonra, ön-enzimimizdeki 64 elektron ve protonun her biri, 2^{64} farklı konfigürasyonun baştaki kuantum süperpozisyonunu yeniden kurabilmek için, neredeyse ânında, olası konumlarının her ikisinin süperpozisyonuna tünelleme yapmaya hazır olacaktır. 64 kübitlik kuantum ön-kopyalayıcı molekül, kuantum dünyasında kendi kendini kopyalama arayışını durmaksızın tekrarlayabilir.

Uyumsuzluk, süperpozisyonu bir kez daha hızla çökertecektir ama bu kez molekül kendini 2^{64} klasik konfigürasyondan bir başkasının içinde bulacaktır. Uyumsuzluk süperpoziyonu yine çökertecek, sistem kendini başka bir konfigürasyonda bulacak ve bu süreç sonsuza kadar devam edecektir. Aslına bakılırsa, bu görece korunaklı ortamda kuantum süperpozisyon durumunun oluşması ve parçalanması tersinir bir süreçtir: kuantum parası, kimyasal bağların klasik anlamda kurulup parçalanmasından çok daha hızlı süreçler olan süperpozisyon ve uyumsuzluk tarafından yazı-tura atmak için havaya fırlatılır durur.

Ancak kuantum yazı-tura atma sürecini sonlandıracak bir şey vardır. Eğer kuantum ön-kopyalayıcı molekül sonunda kendi kendini kopyalayan bir duruma çökerse, kopyalanmaya başlayacak ve tıpkı yedinci bölümde gördüğümüz açlık çeken *E. coli* hücrelerinde olduğu gibi replikasyon, sistemi klasik dünyaya geri dönüşsüz bir geçiş yapmaya zorlayacaktır. Kuantum parası geri dönüşsüz biçimde havaya atılmış ve kendi kendini kopyalayan ilk molekül klasik dünyaya doğmuş olacaktır. Elbette bu replikasyon, molekül içinde ya da molekül ile içinde bulunduğu ortam arasında, ön-kopyalayıcı düzenlemesi bulunmadan önce olanlardan farklı bir tür biyokimyasal süreç gerektirir. Bir başka deyişle, bu özel konfigürasyonu, kaybolup gitmeden ve molekül bir sonraki kuantum düzenlemeye geçmeden önce klasik dünyaya çakıp sabitleyecek bir mekanizmaya ihtiyaç vardır.

İlk kendi kendini kopyalayıcı neye benziyordu?

Yukarıda ana hatlarını çizdiğimiz sav spekülatiftir elbette. Ancak ilk kendi kendini kopyalayıcı arayışı klasik dünyada değil de kuantum dünyasında gerçekleştiyse, bu hiç değilse kendi kendini kopyalayıcı arama sorununu çözebilir.

Bu senaryonun işlemesi için, ön-kendi kendini kopyalayıcı olarak adlandırdığımız ilkel biyomolekül, parçacıklarının farklı konumlara kuantum tünelleme yapması yoluyla pek çok farklı yapıyı

araştırabilecek olmalıdır. Ne tür moleküllerin böyle bir numarayı yapabileceğini biliyor muyuz peki? Aslına bakarsanız, bir yere kadar evet. Daha önce de gördüğümüz gibi, enzimlerdeki elektronlar ve protonlar atoma görece gevşek tutunurlar ki bu, onların farklı konumlara kolayca tünelleme yapabilmesini sağlar. DNA ve RNA'daki protonlar da –en azından hidrojen bağı üzerinden– tünelleme yapabilir. Öyleyse, ilkel kendi kendini kopyalayıcımızı, gevşek hidrojen bağlarıyla ve parçacıklarının (protonlar ve elektronlar) trilyonlarca farklı konfigürasyonun bir süperpozisyonunu oluşturabilmek için kendi yapısı içinde serbestçe dolaşmasına izin veren zayıf elektronik bağlarla bir arada tutulan, protein ya da RNA benzeri bir molekül olarak hayal edebiliriz.

Bu senaryonun gerçek olduğuna dair bir kanıt var mı? Bangalore'daki Hindistan Bilim Enstitüsü Yüksek Enerji Fiziği Merkezi'nden fizikçi Apoorva D. Patel, kuantum algoritmaları –kuantum bilgisayarlarının yazılım programları– konusunda dünyanın önde gelen uzmanlarındandır. Apoorva, genetik şifrenin (amino asitleri şifreleyen DNA baz dizileri) bazı özelliklerinin kuantum kodu kökenini ele verdiğini öne sürüyor.[4] Burada, kuantum bilgi kuramı matematiğinin derinliklerine dalmamızı gerektireceği için teknik detaylara girmeyeceğiz ama Apoorva'nın görüşü çok da şaşırtıcı değil. Dördüncü bölümde, fotosentezde foton enerjisinin aynı anda birden fazla sayıda yolu takip ederek, kuantum yürüyüşle tepkime merkezine nasıl aktarıldığını gördük. Ardından sekizinci bölümde, kuantum hesaplama fikri ve yaşamın belli birtakım biyolojik süreçlerin verimini artırmak için kuantum algoritmalarından yararlanıyor olabileceği ihtimali üzerinde durduk. Benzer şekilde, yaşamın kökenini kuantum mekaniğiyle açıklamaya çalışan senaryolar spekülatif olmakla beraber, bütün bu fikirlerin bir uzantısından başka bir şey değildir ve biyolojide kuantum uyumunun günümüzde canlı hücrelerde oynadığına benzer bir rolü yaşamın başlangıcında da oynamış olabileceği ihtimalini ele almaktadır.

Yaşamın üç milyar yıl önceki kökenine dair kuantum mekaniğini içeren herhangi bir senaryo elbette ki son derece spekülatiftir. Ancak daha önce de söylediğimiz gibi, yaşamın kökeniyle ilgili klasik açıklamalar dahi kendi içinde pek çok sorun barındırmaktadır. Yaşamı yoktan var etmek kolay iş değil! Kuantum mekaniği, daha etkin arama stratejileri sunduğu için, kendi kendini kopyalayıcı yapma işini bir nebze kolaylaştırmış olabilir. Hikâyenin bütünü bundan ibaret değil hiç kuşkusuz ama kuantum mekaniği, tarihöncesi Grönland kayaçlarında yaşamın ortaya çıkışını bir hayli daha mümkün kılmış olabilir.

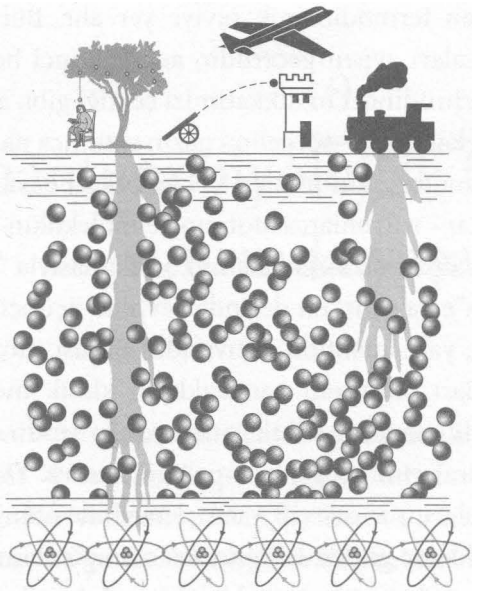
10
Kuantum biyolojisi: fırtınanın sınırında yaşam

Kuantum mekaniği alanını tanımlamak için en sık kullanılan sıfat "tuhaf"tır. Ve gerçekten de tuhaftır. Cisimlerin geçirgen olmayan bariyerlerin içinden geçmesine, aynı anda iki yerde birden bulunmasına ya da "hayaletimsi bağlantılar" kurmasına izin veren bir kuram sıradan sıfatıyla tarif edilemez. Ama gerçekte kuantum mekaniğinin matematiksel yapısı tamamen mantıklı ve tutarlı olup, dünyayı temel parçacıklar ve kuvvetler düzeyinde doğru biçimde tarif eder. O nedenle kuantum mekaniği fiziksel gerçekliğin anakayasıdır. Ayrı enerji düzeyleri, dalga-parçacık ikiliği, uyumluluk, dolanıklık ve tünelleme, seçkin fizik laboratuvarlarında çalışan bilim insanlarının ilgilendiği ilginç fikirler değildir sadece. Bütün bunlar ninenizin pişirdiği kek kadar gerçek ve normaldir, hatta o kekin içinde olup bitmektedir. Kuantum mekaniği normaldir. Tuhaf olan, onun tanımladığı dünyadır.

Ancak daha önce de gördüğümüz gibi, büyük cisimlerin türbülanslı termodinamik iç ortamında uyumsuzluk dediğimiz süreç, kuantum ölçeğinde maddenin sağduyuya aykırı özelliklerini silip süpürür ve geride aşina olduğumuz klasik dünya kalır. Öyleyse fiziksel gerçekliğin üç düzeyden meydana geldiğini düşünebiliriz (şekil 10.1). Yüzeyde futbol topları, trenler ve gezegenler gibi davranışları genel olarak Newton'un hız, ivme, moment ve kuvvetler gibi alışık olduğumuz mekanik hareket kanunlarına uyan, gündelik hayatın makroskobik nesneleri yer alır. Orta kademede sıvıların ve gazların

davranışını tanımlayan termodinamik seviye yer alır. Burada da Newton'un klasik yasaları aynen geçerlidir, ancak ikinci bölümde gördüğümüz üzere, Schrödinger'in dikkatimizi çektiği gibi, altta yatan bu termodinamik kanunlar –sözgelimi gazın ısıtılınca nasıl genleştiğini ya da buhar motorunun trenleri yokuş yukarı nasıl sürdüğünü açıklayan kurallar– trilyonlarca atomun ve molekülün bilardo toplarınınkine benzer düzensiz itiş kakışının ortalamasıyla "düzensizlikten doğan düzen"e dayanır. En derinde yer alan üçüncü düzey gerçekliğin anakayası, yani kuantum dünyasıdır. Burası, atomların, moleküllerin ve bunları oluşturan parçacıkların klasik mekaniğe değil, kesin ve düzenli kuantum kurallarına uyduğu yerdir. Ancak tuhaf kuantum numaralarının çoğu bize pek görünmez. Daha derindeki kuantum yasalarını ancak çift yarık deneyinde olduğu gibi, molekülleri tek tek dikkatle gözlemlediğimiz zaman görebiliriz. Kuantum yasalarının tanımladığı davranışlara aşina değilizdir çünkü biz gerçekliği normalde, bu tuhaflığı büyük cisimlerden bütünüyle kaldıran uyumsuzluk filtresinden süzülmüş haliyle görürüz.

Canlı organizmaların çoğu görece büyük varlıklardır. Trenler, futbol topları ve gülleler gibi onların da genel hareketi Newton kanunlarına uyar: bir toptan fırlatılan insan, gülleninkine benzer bir yörünge izler. Daha derinde, dokuların ve hücrelerin fizyolojisi de termodinamik yasalarıyla gayet iyi açıklanır. Akciğerin şişip sönmesi bir balonun şişip sönmesinden çok da farklı değildir. O halde çoğu bilim insanının yaptığı gibi siz de ilk bakışta kuantum davranışının diğer klasik cisimlerde olduğu gibi kızılgerdanlarda, balıklar, dinozorlar ve elma ağaçlarında, kelebeklerde ve bizzat kendimizde silinip gittiğini varsayabilirsiniz. Ancak bunun yaşam için her zaman doğru olmadığını gördük; kökler Newtoncu yüzeyden aşağıya inip, türbülanslı termodinamik sulardan geçtikten sonra kuantum anakayasına nüfuz ederek yaşamın uyumluluk, süperpozisyon, tünelleme ya da dolanıklıktan faydalanmasına olanak tanır (şekil 10.1). Son bölümde yanıtlamaya çalışacağımız soruysa şudur: Nasıl?



Şekil 10.1: Gerçekliğin üç katmanı. En üst tabaka, yere düşen elmalar, top gülleleri, buharlı trenler ve uçaklar gibi hareketleri Newton mekaniği ile açıklanan cisimlerle dolu görünür dünyadır. Bunun altında, hareketleri neredeyse tamamen rastgele olan bilardo topu benzeri parçacıkların termodinamik katmanı yer alır. Bu katman, buhar motorları gibi cisimlerin davranışına hükmeden "düzensizlikten doğan düzen" kanunlarının oluşumundan sorumludur. En alttaki katman, düzenli kuantum yasalarıyla yönetilen temel parçacıklar katmanıdır. Etrafımızdaki varlıkların görülebilir özelliklerinin çoğunun kökleri ya Newtoncu ya da termodinamik katmanlara uzanır, ancak canlı organizmalarda bu kökler daha da derine inerek gerçekliğin kuantum anakayasına nüfuz eder.

Soruyu zaten kısmen yanıtlamıştık. Erwin Schrödinger altmış yılı aşkın bir süre öncesinde, yaşamın moleküler düzeyde dahi yapılandırılmış ve düzenli olmasından ötürü, inorganik dünyadan farklı olduğuna işaret etmişti. Kökleri derine inen bu düzen yaşama, moleküler düzeyle makroskobik düzeyi birbirine bağlayan ve böylece tek tek biyomoleküllerde gerçekleşen kuantum olaylarının organizmanın bütününü ilgilendiren sonuçlar doğurmasına yol açan bir tür değişmez avantaj, diğer kuantum öncüsü Pascual Jordan'ın

öne sürdüğü gibi kuantumdan makroskobik düzeye doğru gerçekleşen bir tür amplifikasyon sağlamaktadır.

Schrödinger ve Jordan'ın biyoloji üzerine yazdığı dönemde genin neden yapılmış olduğu ya da enzimlerin veya fotosentezin işleyiş mekanizması bilinmiyordu elbette. Fakat moleküler biyoloji alanında yarım asırlık yoğun bir araştırma, biyomoleküllerin yapısının, DNA ya da proteinlerde atom düzeyine varan olağanüstü ayrıntılı bir haritasını sundu bize ve daha önce de gördüğümüz gibi ileri görüşlü kuantum öncülerinin haklı olduğu geç de olsa doğrulandı. Fotosistemlerin, enzimlerin, solunum zincirlerinin ve genlerin yapıları her bir parçacığının konumuna dek belirlenmiştir ve bunların kuantum hareketleri canlı kalmamamızı sağlayan solunum, vücudumuzu inşa eden enzimler ya da gezegenimizdeki biyokütlenin neredeyse bütününü yapan fotosentez açısından gerçekten de fark yaratır.

Yine de özellikle yaşamın canlı hücre içindeki sıcak, ıslak biyomoleküller denizinde kuantum uyumluluğunu korumayı nasıl başarabildiğine ilişkin yanıtlanmayı bekleyen pek çok soru var hâlâ. Proteinler ya da DNA, fizik laboratuvarlarında kuantum etkilerini saptamak için kullanılan cihazlar gibi çelikten yapılmış sert makineler değildir; durmaksızın kendi termal titreşimlerine maruz kalmanın yanı sıra, etraftaki moleküler bilardo topları tarafından devamlı hırpalanarak sürekli bir *moleküler gürültü*nün* yaylım ateşi altında olan yumuşak ve esnek yapılardır. Parçacıkların kuantum davranışını sürdürmesi gerekirken, bu gelişigüzel titreşimler ve çarpışmaların, atomların ve moleküllerin narin dizilimini darmadağın etmesi beklenir. Biyolojide bu uyumluluğun nasıl korunabildiği hâlâ bir bilmece olmakla birlikte az sonra göreceğimiz gibi bu bilmece, yaşamın işleyişinin içyüzünü kavrayabileceğimiz şekilde çözülmeye başlamıştır ve bu kavrayış geleceğin kuantum teknolojilerini yönlendirmek için kullanılabilir.

* Bu terim genellikle uyumsuz moleküler titreşimleri tarif etmek için kullanılır.

İyi, iyi, iyi, iyi titreşimler (bap bap)*

Pek az popüler bilim kitabı yazıldığı sırada revizyon gerektirir; buna karşılık biz bu son bölümde şimdilerde elde edilen sonuçlara değineceğiz. Kuantum biyolojisi bilimi, o kadar farklı cephelerde gerçekten de o denli hızlı ilerliyor ki bu kitabın yayımlandığında güncelliğini biraz yitirmiş olması kaçınılmaz. Son çalışmaların getirdiği en şaşırtıcı sürprizler, yaşamın moleküler titreşimler ya da gürültü ile nasıl başa çıktığının içyüzünü kavramamıza yardımcı oluyor.

Bu alandaki en heyecan verici yeni sonuçların bazıları fotosentezle ilgili çalışmalardan elde ediliyor. Dördüncü bölümden hatırlayacağınız üzere, mikroplar ve bitki yaprakları, klorofil pigment molekülü ormanlarıyla dolu kloroplastlarla yüklüdür ve fotosentezin ilk basamağı bir ışık fotonunun bir pigment molekülü tarafından yakalanmasını ve klorofil ormanından tepkime merkezine hızla sürüklenen bir eksitona dönüşmesini içerir. Yine hatırlayacağınız gibi, bu enerji taşınması sürecinde kuantum uyumunun imzası olarak saptanan kuantum vuru, işlemin yüzde 100'e yakın olan veriminin, tepkime merkezine doğru kuantum yürüyüş yapan eksitonlar sayesinde gerçekleştiğinin bir kanıtıdır. Ancak eksitonların canlı bir hücrenin gürültülü moleküler ortamında ilerlerken uyumlu dalga benzeri davranışını nasıl koruduğu yakın zamana kadar gizemini koruyordu. Oysa artık yanıtın, göründüğü kadarıyla canlı sistemlerin moleküler titreşimden sakınmak yerine onun ritmine uygun dans etmesinde gizli olduğunu biliyoruz.

Dördüncü bölümde, fotosentezde kuantum uyumunu, bütün uyumlu pigment moleküllerinin aynı tempoda çaldığı, eseri "ahenkli" ve "uygun tempoda" çalan bir orkestranın moleküler biçimi olarak canlandırmıştık zihnimizde. Ancak hücre içi ortamın çok gürültülü olması, sistemin üstesinden gelmesi gereken bir

* Amerikalı rock grubu Beach Boys'un "Good Vibrations" adlı şarkısının sözlerinden (*ç.n.*)

sorundur. Bu moleküler orkestra sessiz bir konser salonundan çok, kalabalık bir şehir merkezinde, müzisyenlerin dikkatini dağıtan ve böylece eksiton salınımlarının ahengini bozarak hassas kuantum uyumunun kaybolmasına yol açan bir moleküler kakofoninin ortasında çalıyor gibidir.

Kuantum bilgisayarı gibi cihazlar geliştirmeye çalışan mühendisler ve fizikçiler bu zorluğa aşinadır. Gürültüyü saf dışı bırakmak için iki ana strateji izlerler. Öncelikle, ellerindeki sistemi, eğer mümkünse, neredeyse mutlak sıfır derecesine kadar soğuturlar. Bu denli düşük sıcaklıklarda moleküler titreşimlerin sönümlenmesiyle birlikte moleküler gürültü bastırılır. İkinci olarak, donanımlarını ses stüdyosunun eşdeğeri olabilecek bir kalkanla koruyarak çevresel gürültüyü saf dışı bırakırlar. Oysa canlı hücrelerin iç ortamında ses stüdyosu yoktur ve bitkilerle mikroplar sıcak ortamlarda yaşar; o halde nasıl oluyor da fotosistemler ahenkli kuantum uyumunu bu denli uzun süre devam ettirebiliyor?

Görünüşe göre yanıt fotosentetik tepkime merkezlerinin iki moleküler gürültü çeşidini, kuantum uyumunu yok etmekten çok korumak için kendi çıkarına kullanmasında gizli. Bunlardan biri, *beyaz gürültü* de denen, TV ya da radyodaki statik gürültü gibi tüm frekanslarda yayılan, nispeten zayıf ve düşük seviyeli gürültüdür.* Beyaz gürültü, hücreyi dolduran su ya da metal iyonları gibi etraftaki bütün moleküllerin termal moleküler itiş kakışından kaynaklanır. *Renkli gürültü* olarak adlandırılan ikinci çeşit gürültü ise daha "yüksek sesli"dir ve renkli (görünür) ışığın elektromanyetik spektrumun dar bir aralığıyla sınırlı olmasına benzer şekilde belirli frekanslarla sınırlıdır. Renkli gürültünün kaynağı, kloroplastlardaki pigment (klorofil) molekülleri ile onları yerinde tutan ve pigment moleküllerinin yerleşebileceği şekilde kıvrılıp bükülen amino asit dizilerinden meydana gelen protein yapılar gibi daha büyük moleküllerdir. Bu kıvrımlar ve bükülmeler esnektir ve moleküller

* Titreşimlerin amplitüdü bir hayli küçük olduğundan bunlar fazla enerji vermez.

titreşebilir, ancak bunu –bir gitarın tellerinde olduğu gibi– sadece belirli frekanslarda yapabilirler. Bu titreşimler, akorlara benzer şekilde yalnızca birkaç notadan oluşan renkli gürültüyü yaratır. Görünüşe göre fotosentetik tepkime sistemleri, uyumlu eksitonu tepkime merkezine dek gütmek için hem beyaz hem de renkli gürültüden faydalanmaktadır.

Yaşamın bu tür moleküler titreşimi kendi çıkarı için nasıl kullandığına dair ipuçları 2008-9 yıllarında iki grup tarafından ayrı ayrı bulunmuştur. Bunlardan biri, o dönemde Birleşik Krallık'ta çalışan ve uzun zamandan beri harici "gürültü"nün kuantum sistemlerinin dinamikleri üzerindeki etkileriyle ilgilendikleri için Graham Fleming'in dördüncü bölümde bahsettiğimiz 2007 tarihli fotosentez deneyini duyduklarında şaşırmayan Martin Plenio ve Susana Huelga çiftiydi. Neler olup bittiğine dair düşüncelerini açıklayan bir model sunan ve bugün artık sıkça atıfta bulunulan makalelerini hızla yayımladılar.[1] Canlı hücrenin gürültülü iç ortamının kuantum dinamiklerini yürütücü etki gösteriyor ve fotosentez kompleksleri ile diğer biyolojik sistemlerde kuantum uyumunu yok etmeyip koruyor olabileceğini ileri sürdüler.

Antlantik'in karşı yakasındaki diğer grup, başlangıçta bitkilerde kuantum mekaniği etkisinin çılgınca bir fikir olduğunu düşünen, Seth Lloyd'un önderliğinde çalışan MIT merkezli kuantum enformasyon ekibiydi. Lloyd, yakındaki Harvard Üniversitesi'nde çalışan meslektaşlarıyla birlikte, Fleming ile Engel'in kuantum vuruyu saptadığı, alg fotosentez kompleksini daha yakından inceledi.[2] Çevresel gürültünün, kuantum uyumlu eksiton taşımasını, gürültünün yalnızca ne kadar *yüksek* olduğuna bağlı olarak yavaşlatabileceğini ya da destekleyebileceğini gösterdiler. Eğer sistem çok soğuk ve sessizse, eksiton belli bir yere varmaksızın amaçsızca salınım yapma eğilimine girer; buna karşılık çok sıcak ve gürültülü bir ortamda *kuantum Zenon etkisi* denen bir durum devreye girerek kuantum taşımayı yavaşlatır. Bu iki uç arasında, kuantum taşıma için doğru titreşimlerin bulunduğu *Goldilocks bölgesi* bulunur.

Kuantum Zenon etkisinin adı, felsefi sorunları bir grup paradoksla ortaya koymuş antik Yunan filozofu Elealı Zenon'dan gelir. Bunlardan biri olan ok paradoksunda Zenon, uçarken her an uzayda belli bir konumda bulunması gereken bir ok tasavvur etmiştir. Zenon, okun bir anlık görüntüsü yakalanabilse, onun aynı konumda havada asılı kalmış hareketsiz bir oktan ayırt edilemeyeceğini savunmuştur. Buradaki paradoks, okun uçuşunun, hareketsiz bir okun uçan okun yolu üzerindeki her bir noktada bulunduğu, zamanda donmuş kesitler dizisinden meydana gelmesidir. Ancak, bu kesitleri bir araya getirdiğinizde ok hareket eder. O halde sıfır hareketten oluşan böyle bir dizi bir araya gelerek nasıl gerçek hareketi oluşturur? Artık bu sorunun yanıtını, sonlu bir zaman diliminin, bölünemez sıfır süre birimleri dizisinden oluşmadığını biliyoruz. Fakat bu soru, Zenon'un paradoksu ileri sürmesinin üzerinden iki bin yılı aşkın zaman geçip de on yedinci yüzyılda kalkülüs bulunana kadar çözümsüz kaldı. Yine de Zenon paradoksu en azından ismen, kuantum mekaniğinin en acayip özelliklerinden birinde varlığını sürdürmektedir. Kuantum oklar, gözlem yoluyla zamanda gerçekten de dondurulabilir.

1977'de Texas Üniversitesi'nden fizikçiler, Zenon'un ok paradoksuna benzer bir durumun kuantum dünyasında gerçekleşebileceğini gösteren bir makale yayımladılar.[3] Kuantum Zenon etkisi olarak bilinen bu durum, sürekli gözlemlerin kuantum olaylarının ortaya çıkmasını nasıl engelleyebileceğini açıklar. Mesela bir radyoaktif atom yakından sürekli olarak gözlemlenirse asla bozunuma uğramaz; bu etki eski bir deyiş olan "başında beklenen su kaynamaz" ifadesiyle uyumludur. Gerçekte su eninde sonunda kaynar elbette; lakin canınız çok çay çekiyorsa zaman size yavaşlamış gibi gelir. Ancak Heisenberg'in de işaret ettiği gibi, kuantum dünyasında izleme (ölçme) eylemi, izlenen şeyin durumunu kaçınılmaz olarak değiştirir.

Zenon paradoksunun yaşamla nasıl bir bağlantısı olduğunu anlamak için fotosentezdeki enerji taşınması basamağına geri döneceğiz. Bir yaprağın az önce güneşten gelen bir fotonu yakalayıp

enerjisini bir eksitona çevirdiğini hayal edelim. Klasik olarak düşündüğünüzde eksiton uzay ve zamanda yeri belli bir parçacıktır. Ancak çift yarık deneyinin ortaya koyduğu gibi kuantum parçacıkları, eşzamanlı olarak birden çok yerde kuantum süperpozisyon halinde bulunabilmelerini sağlayan yaygın bir dalga özelliğine de sahiptir. Etkin kuantum taşıma için gerekli olan da eksitonun tıpkı bir su dalgası gibi çok sayıda yolu aynı anda araştırabilmesini sağlayan bu dalga özelliğidir. Ancak onun bu kuantum dalga özelliği yaprağın içinde uyumsuzluğun gürültülü moleküler kayalıklarına çarparsa yiter gider ve eksiton tek bir konuma sıkışıp kalan lokalize bir parçacık haline gelir. Gürültü bir çeşit sürekli ölçüm gibi davranır ve çok şiddetli olduğunda, kuantum uyumu, varacağı yere ulaşmasında eksitona yardımcı olma fırsatı bulamadan uyumsuzluk hızla devreye girer. İşte kuantum Zenon etkisi budur: kuantum dalgası durmaksızın klasik dünyaya çöker.

MIT ekibi moleküler gürültünün/titreşimlerin bakteriyel fotosentez kompleksi üzerindeki etkisini hesaplayarak tahmin ettiği zaman, kuantum taşımanın, mikropların ve bitkilerin fotosentez yaptığı sıcaklıklar civarında optimum olduğunu keşfetti. Optimum taşıma verimi ile canlı organizmaların içinde yaşadığı sıcaklıklar arasındaki bu mükemmel uyum olağanüstüdür ve ekibin iddiasına göre üç milyar yıllık doğal seçilimin, biyosferdeki en önemli biyokimyasal tepkimeyi optimize etmek için eksiton taşınmasıyla ilgili kuantum düzeyinde evrimsel mühendisliğin ince ayarını yaptığını göstermektedir. Daha sonraki bir makalelerinde savundukları düşünceye göre "doğal seçilim, kuantum sistemleri maksimum verimliliği 'tam da sağlayacak' derecede kuantum uyumuna yükseltmektedir."[4]

Ancak iyi moleküler titreşimler beyaz gürültüyle sınırlı değildir. Klorofil moleküllerinin, hatta bunları çevreleyen proteinlerin sınırlı titreşimlerinin oluşturduğu "renkli" gürültünün de kuantum uyumsuzluğunu uzak tuttuğu düşünülüyor artık. Beyaz termal gürültüyü istasyon ayarı iyi yapılmamış radyodaki statik gürültünün

moleküler biçimi olarak düşünürsek, renkli gürültünün iyi titreşimleri Beach Boys'un "Good Vibrations" adlı şarkısındaki basit "bap bap" ritmine benzer. Ancak unutmayın ki eksiton aynı zamanda, Graham Fleming'in grubunun saptadığı uyumlu kuantum vuruları-nı oluşturan dalga benzeri bir davranış gösterir. Martin Plenio'nun Almanya Ulm Üniversitesi'ndeki grubunun 2012 ve 2013 yıllarında yayımladığı iki makale, eksiton salınımıyla etraftaki proteinlerin salınımlarının –renkli gürültü– aynı ritmi tutturmaları halinde, kuantum uyumlu eksitonun ahengi beyaz gürültü tarafından bozulsa bile, protein salınımlarının eksitonu tekrar ahenkli hale getirebileceğini göstermiştir.[5] Gerçekten de 2014 yılında *Nature*'da yayımlanan bir makalede, University College London'dan Alexandra Olaya-Castro yaptığı harika bir kuramsal çalışmada, eksiton ile moleküler titreşimlerin –renkli gürültü– kuantum mekaniğine başvurmaksızın açıklanamayan tek bir enerji kuantumunu paylaştığını göstermiştir.[6]

Bu iki farklı moleküler gürültünün eksiton taşınmasındaki katkılarını tam anlamıyla kavrayabilmek için bir kez daha bir müzikal metafora dönüp fotosistemi bir orkestra olarak hayal edelim; bu orkestrada çeşitli müzik aletleri pigment moleküllerinin rolünü üstlenmiştir, eksiton ise bir ezginin yerini tutar. Müziğin, fotonu yakalayıp onun enerjisini titreşen bir eksitona dönüştüren pigment molekülünü temsil eden bir keman solosuyla başladığını hayal edelim. Eksitonun müziğine önce diğer yaylılar, sonra üflemeliler ve en sonunda da yarattığı ritimle tepkime merkezinin rolünü üstlenen vurmalılar katılır. Bu müziğin hınca hınç izleyiciyle dolu bir konser salonunda icra edildiğini düşünelim. Ambalaj hışırtıları, açılıp kapanan sandalye sesleri, öksürük ve aksırıklarla izleyiciler beyaz gürültüyü oluşturur. Renkli gürültü ise şef konumundadır.

Diyelim ki konser salonuna gittiğimiz akşam çok gürültü yapan bir kalabalık var, öyle ki izleyicilerin curcunasından müzisyenler ne kendilerini ne de diğer orkestra üyelerini duyabiliyorlar. Bu şamatanın ortasında birinci keman parçaya giriş yapıyor ama diğer müzisyenler onu duyamadıkları için melodiye devam edemiyorlar.

İşte bu, çok fazla gürültünün kuantum taşımayı engellediği kuantum Zenon senaryosudur. Buna karşılık gürültü düzeyi çok düşük olduğunda, mesela hiç izleyicinin olmadığı bomboş bir konser salonunda, müzisyenler sadece birbirlerini dinleyecek ve hepsi ilk ezgiyi yakalayıp, kafanıza takılan bir melodi gibi onu çalıp duracaktır. İşte bu da, eksitonun bütün sistem boyunca salınım halinde kaldığı ama haddinden fazla kuantum uyumundan ötürü bir türlü belli bir yere varamadığı tam tersi senaryodur.

Kendini kontrol edebilen bir izleyici kitlesinin tam da doğru miktarda gürültü yaptığı Goldilocks bölgesinde dikkat dağıtma düzeyi, müzisyenleri monoton bir tekrar döngüsünden kurtarıp müziği başından sonuna bütün dinamikleriyle icra etmek üzere harekete geçirir. Arada sırada saygısız bir izleyicinin açtığı ambalajın hışırtısı çalgılardan bazılarının uyumunu bozsa da, şef onları fotosentez müziğini icra etmek üzere batonunun tek bir hareketiyle senkronize hale getirir.

Yaşamın itici kuvvetine dair düşünceler

İkinci bölümde bir buhar motorunun içine göz atıp buradaki itici kuvvetin, bilardo topu benzeri moleküller denizindeki gelişigüzel hareketleri yakalayıp, moleküler türbülansı silindirin pistonunu harekete geçirmek üzere yönlendirdiğini gördük. Ardından yaşamın da bütünüyle buhar motorlarını hareket ettiren, termodinamiğin "düzensizlikten doğan düzen" ilkesiyle açıklanıp açıklanamayacağını sorduk. Yaşam karmaşık bir buhar motorundan mı ibarettir?

Pek çok bilim insanı öyle olduğuna inanıyor ama burada biraz daha detaya girmemiz lazım. Karmaşıklık kuramı, gelişigüzel kaotik hareketlerin belli biçimlerinin *kendi kendini örgütleme* fenomeniyle düzen oluşturmasını inceler. Örneğin, daha önce de üzerinde durduğumuz gibi, sıvıların yapısındaki moleküller tamamen kaotik hareketler sergiler; bununla birlikte küveti boşaltırken su giderden düzenli bir hareketle saat yönünde ya da saatin tersi yönde akar.

Bu makroskobik düzen sıcak çaydanlığın üzerindeki konveksiyon akımında, kasırgalarda, hortumlarda, Jüpiter'in kızıl noktasında ve pek çok başka doğa fenomeninde de izlenebilir. Kendi kendini örgütleme kuşlar, balıklar ve böceklerdeki sürü davranışıyla, zebranın çizgilerindeki örüntüyle veya bazı yaprakların karmaşık fraktal yapısıyla da ilgilidir.

Bütün bu sistemlerde dikkat çekici olan şey görebildiğimiz makroskobik düzenin moleküler düzeye yansımamasıdır. Küvetinizin giderinden akan molekülleri gösterebilecek kadar güçlü bir mikroskobunuz olsaydı, saat yönünde ya da saatin tersi yönde gerçekleşen çok hafif bir sapma dışında moleküler hareketlerin neredeyse bütünüyle rastgele olduğunu görmek sizi şaşırtabilirdi. Moleküler düzeyde sadece kaos vardır ama makroskobik düzeyde düzen yaratabilen hafif bir sapmayla birliktedir bu kaos ve o yüzden de kaostan doğan düzen ilkesi olarak adlandırılır.[7]

Kaostan doğan düzen ilkesi kavramsal olarak, daha önce de açıkladığımız gibi buhar motorlarındaki itici kuvvetin altında yatan ve Erwin Schrödinger'in "düzensizlikten doğan düzen" olarak adlandırdığı duruma oldukça benzer. Ama biliyorsunuz ki yaşam farklıdır. Hücrelerin içinde bolca düzensiz moleküler hareket olmakla birlikte, yaşamın gerçek hareketi enzimlerdeki, fotosentez sistemlerindeki, DNA ve başka moleküllerdeki temel parçacıkların sıkı sıkıya bağlı olduğu bir koreografiyle gerçekleştirdiği harekettir. Yaşamın mikroskobik düzeyde yapısal düzeni vardır; dolayısıyla "kaostan doğan düzen" yaşamın ayırt edici özelliklerinin tek açıklaması olamaz. Yaşam buharlı trene *hiç* benzemez.

Bununla birlikte yeni araştırmalar, yaşamın, buhar motorunun kuantum sürümü gibi çalışıyor olabileceğini düşündürmektedir.

Buhar motorlarının çalışma ilkeleri ilk kez on dokuzuncu yüzyılda Fransız Sadi Carnot tarafından ana hatlarıyla ortaya konmuştur. Napolyon'un savaş bakanı olan babası Lazare Carnot, XVI. Louis'nin ordusunda istihkâm sınıfında görev almıştır. Kral taht-tan indirildikten sonra Lazare Carnot, aristokrat meslektaşlarının

çoğunun tersine ülkeden kaçmak yerine devrime katılmıştı. Savaş bakanı olarak, Prusya istilasını geri püskürten Fransız devrimi ordusunun kurulmasında büyük sorumluluk üstlenmişti. Lazare, parlak bir askeri strateji uzmanı olmanın yanı sıra bir matematikçi, bir müzik ve şiir hayranı (oğluna ortaçağ Farisi şairi Sadi Şirazi'nin adını vermişti) ve bir mühendisti; makinelerin bir enerji biçimini bir başkasına nasıl dönüştürdüğüne ilişkin bir kitap yazmıştı.

Sadi babasının devrimci ve milliyetçi tutkularından payına düşeni almıştı; 1814'te Paris'te öğrenciyken, Prusyalıların tekrar kuşatma altına aldığı şehrin savunmasında görev üstlendi. Mühendislik zekâsı açısından da babasına çekmişti; termodinamik biliminin başlangıcı kabul edilen dikkat çekici kitabı *Ateşin İtici Gücü Üzerine Düşünceler* (1823) adlı eseri yazdı.

Sadi Carnot buhar motorlarının tasarımından ilham almıştı. Fransa'nın Napolyon savaşlarındaki mağlubiyetinin, İngiltere gibi buhar gücünden faydalanarak ağır sanayi kuramamış olmasından kaynaklandığına inanıyordu. Ancak buhar motoru İngiltere'de icat edilmiş ve başarıyla ticarileştirilmiş olmasına rağmen, tasarımı büyük ölçüde İskoç mucit James Watt gibi mühendislerin önsezilerine ve deneme yanılma yöntemine dayanıyordu. Herhangi bir kuramsal temeli yoktu. Carnot bu durumu düzeltmenin yolunu aradı ve buharlı trenlerdeki motorlar gibi ısı motorlarının, günümüzde *Carnot döngüsü* olarak bilinen döngüsel süreçle iş yaptırmak üzere nasıl kullanılabileceğini matematiksel terimlerle açıkladı.

Carnot döngüsü bir ısı motorunun enerjiyi sıcak bir yerden soğuk bir yere nasıl aktardığını ve başlangıçtaki durumuna dönmeden önce bu enerjinin bir kısmını yararlı bir iş yapmak için nasıl kullandığını açıklar. Örneğin, bir buhar motoru ısıyı sıcak kazandan soğutucu kondansöre aktarır ve bu işlem sırasında ısı enerjisinin bir kısmı buharın pistonu hareket ettirmesi üzerinden lokomotif tekerleklerinin hareketi için kullanılır. Buharın soğutulmasıyla oluşan su, bir sonraki Carnot döngüsünde ısıtılmak üzere tekrar kazana döner.

Carnot döngüsü ilkesi, sanayi devrimini başlatan buhar motorlarından arabanızdaki benzin motoruna ya da buzdolabınızdaki elektrikli pompaya kadar, hangi çeşit olursa olsun iş yapmak için ısı kullanan bütün motor tiplerinde geçerlidir. Carnot bu motorların her birinin –hatta kendi ifadesiyle "hayal edilebilecek her ısı motorunun"– veriminin birkaç temel ilkeye dayandığını göstermiştir. Dahası, klasik bir ısı motorunun veriminin *Carnot limiti* olarak bilinen kuramsal maksimum değeri aşamayacağını kanıtlamıştır. Sözgelimi, 25 watt mekanik güç elde etmek için 100 watt elektrik gücü kullanan bir elektrik motorunun verimi yüzde 25'tir; bu motor enerjisinin yüzde 75'ini ısı olarak kaybeder. Klasik ısı motorları pek verimli değildir.

Carnot ısı motorlarının ilkeleri ve sınırlamaları son derece yaygın olup, kimi binaların çatılarında, yakaladığı ışık enerjisini elektrik enerjisine çeviren fotoseller için dahi geçerlidir. Aynı durum, yapraklardaki kloroplastlarda bulunan biyolojik fotoseller için de doğrudur. Böyle bir *kuantum ısı motoru* klasik bir ısı motorunun yaptığına benzer bir iş yapar ama buhar yerine elektronları, ısı kaynağı yerine ışık fotonlarını kullanır. Elektronlar önce fotonları soğurup daha yüksek bir enerji seviyesine çıkar. Daha sonra gerektiğinde faydalı kimyasal iş yapması için bu enerjiyi verebilirler. Geçmişi Albert Einstein'ın çalışmalarına kadar uzanan bu düşünce daha sonraları lazerin dayandığı ilkeleri oluşturmuştur. Sorun, bu elektronlardan çoğunun enerjisini daha kullanmaya fırsat bulamadan ısı olarak kaybetmesidir. Bu durum böylesi bir kuantum ısı motorunun verimini kısıtlar.

Hatırlarsanız, fotosentez komplekslerinde salınım yapan bütün eksitonların son durağı tepkime merkeziydi. Şimdiye dek enerji sevkiyatı sürecine odaklandık ama fotosentezin asıl gerçekleştiği yer tepkime merkezidir. Burada eksitonların narin enerjisi, bitkilerle mikropların başka bitkiler ve mikroplar üretmek ve benzeri pek çok faydalı işi yapmak için kullandığı, elektron taşıyıcı molekülün kararlı kimyasal enerjisine dönüştürülür.

Tepkime merkezinde olan bitenler, eksitonun taşınması aşamasında gerçekleşenler kadar olağanüstü, hatta daha da gizemlidir. Oksidasyon, elektronların atomlar arasında hareket etmesini sağlayan kimyasal süreçtir. Oksidasyonların pek çoğunda elektronlar genellikle bir atomdan (yükseltgenen atom) diğerine sıçrar. Ama kömür, odun ya da karbon bazlı herhangi bir yakıtın yanması gibi diğer oksidasyon olaylarında, başlangıçta tek bir atomun sahip olduğu elektronlar sonunda diğer atomlarla ortaklaşılır; dolayısıyla elektron vericisi açısından net bir elektron kaybı söz konusudur (tıpkı çikolatanızı paylaştığınızda net bir çikolata kaybınız olması gibi). Karbon havayla yanarken dış yörüngesindeki elektronları oksijenle ortaklaşması sonucu meydana gelen moleküler bağlarla karbondioksit oluşturur. Bu yanma tepkimelerinde karbonun dış elektronları nispeten gevşek bağlı olduğundan atomun bunları ortaklaşması nispeten kolaydır. Ancak bir bitkinin ya da mikrobun fotosentez tepkime merkezinde, elektronları çok daha sıkı bağlı oldukları su moleküllerinden koparmak için enerji kullanılır. Bir çift H_2O molekülü parçalanarak bir O_2 molekülü, pozitif yüklü dört hidrojen iyonu ve dört elektron elde edilir. Tepkime merkezi, su molekülleri burada elektronlarını *kaybettiği* için suyun yükseltgendiği tek doğal ortamdır.

2011 yılında, şu anda Texas A&M Üniversitesi ve Princeton'da profesör olarak çalışan Amerikalı fizikçi Marlan Scully, ABD üniversitelerindeki çalışma arkadaşlarıyla birlikte, standart kuantum ısı motorunun verimlilik limitlerini aşan hipotetik bir kuantum ısı motorunun mühendisliğine ilişkin zekice bir yöntem tarif etti.[8] Bunu yapabilmek için bir elektron, moleküler gürültü kullanılarak aynı anda iki enerji durumunda süperpozisyona getirilecek şekilde hafifçe dürtülür. Bu elektron, bir fotonun enerjisini soğurup "uyarıldığı" zaman, aynı anda iki (artık daha da fazla) enerjide süperpozisyon halinde kalır. İki enerji durumunun kuantum uyumu sayesinde, artık elektronun ilk durumuna dönme ve enerjisini boşa harcanmış ısı olarak kaybetme olasılığı azaltılabilir. Bu, dördüncü bölümde

anlattığımız çift yarık deneyinde elde edilen girişim deseni örneğine benzer. O örnekte, arka ekran üzerinde, sadece bir yarık açıkken atomun ulaşabileceği kimi konumlar, iki yarık birden açıldığında yıkıcı girişim nedeniyle ulaşılamaz hale gelir. Burada moleküler gürültü ile kuantum uyumu arasındaki hassas işbirliği, bir kuantum ısı motorunu verimsiz termal enerji israfını azaltacak şekilde ayarlayarak, sistemin verimini kuantum Carnot limitinin ötesine taşır.

Fakat kuantum düzeyinde böyle hassas bir ayarlama yapmak mümkün müdür? Verimli yollar üzerindeki enerji akışını artırmak ve enerji israfı olan yollardaki akışı ortadan kaldırmak amacıyla tam da doğru miktarda girişim sağlamak için bireysel elektronların hem konumunu hem de enerjisini atomaltı ölçekte planlayıp düzenlemeniz gerekir. Ayrıca ortamdaki beyaz gürültüyü, ritmi kaçıran elektronları tekrar aynı ritme getirmek için dürtecek şekilde ayarlamanız gerekir ama bunu gereğinden kuvvetlice yaparsanız elektronlar farklı ritimlere kayar ve kuantum uyumu kaybolur. Evrende, atomaltı dünyasının hassas kuantum etkilerini kendi yararına kullanabilecek denli ince ayarlanmış bir moleküler düzeni bulabileceğimiz bir yer var mı?

Scully'nin 2011 yılındaki makalesi tamamen kuramsaldı. Bugüne kadar hiç kimse, Carnot limitinin kırılmasından beklenen enerji fazlasını elde edebilecek bir kuantum ısı motoru yapmayı başaramamıştır. Ancak 2013'te aynı ekibin yayımladığı bir başka makale fotosentez tepkime merkezleriyle ilgili ilginç bir gerçeğe işaret ediyordu.[9] Bu merkezler, doğrudan kuantum ısı motoru gibi çalışabilen tek bir klorofil molekülü değil, *özel çift* olarak bilinen bir çift klorofil molekülü içerir.

Özel çiftteki klorofil molekülleri özdeş oldukları halde, protein iskeletin içinde, az da olsa farklı frekanslarda titreşmelerine, yani hafif bir ahenksizliğe neden olan farklı ortamlara gömülü halde bulunur. Scully ve meslektaşları ikinci makalelerinde, bu yapının fotosentez tepkime merkezlerine, kuantum ısı motorları gibi çalışmaları için gereken moleküler mimariyi kazandırdığına dikkat

çekmiştir. Araştırmacılar, özel çiftin göründüğü kadarıyla, enerjinin boşa harcandığı verimsiz yollara ket vurarak, enerjiyi alıcı moleküle Carnot'nun yaklaşık 200 yıl önce bulduğu limiti yüzde 18 ila 27 oranında aşan bir verimle ulaştırmak için kuantum girişimden faydalanmak üzere ayarlı olduğunu göstermişlerdir. Bu o kadar da büyük bir oran gibi görünmeyebilir, ancak dünyadaki enerji tüketiminin 2010-2040 yılları arasında yüzde 56 oranında artacağına ilişkin güncel tahmini düşününce işin rengi değişir. İşte o zaman enerji üretimini bu oranda destekleyebilen bir teknoloji geliştirmek çok önemli görünüyor. Hızla gelişmekte olan alandaki bu bulgular hâlâ tartışmalı olmakla birlikte, Ulm Üniversitesi'nde yapılan yeni bir çalışma[10] kuantum ısı motoru hipotezini pek çok açıdan doğrulamaktadır.

Bu olağanüstü sonuç, kökleri kuantum dünyasının derinlerinde bulunan canlı organizmaların, cansız makroskobik makinelerde bulunmayan becerilere sahip olduğuna dair bir başka çarpıcı örnek oluşturur. Bu senaryonun işlemesi için kuantum uyumu gereklidir elbette; ancak 2014 Temmuz'unda yayımlanan bir başka çalışmada Hollanda, İsveç ve Rusya'dan bir araştırma ekibi, bitki fotosistemi tepkime merkezi II'de* kuantum vuru saptamış ve dahası bu merkezlerin "kuantum tasarımlı ışık tuzakları" olarak işlev gördüğünü iddia etmiştir.[11] Bu arada fotosentez tepkime merkezlerinin iki ila üç milyar yıl önce evrimleştiğini unutmayın. Dolayısıyla neredeyse gezegenimizin bütün tarihi boyunca bitkiler ve mikroplar, karbona enerji pompalamak ve böylece mikropları, bitkileri, dinozorları ve tabii ki bizi oluşturan biyokütleyi üretmek için, bugün dahi kendimiz üretemediğimiz kadar karmaşık ve zekice olan kuantum destekli ısı motorlarını kullanagelmiştir. Gerçekten de antik kuantum enerjisinin nimetlerinden, evlerimizi ısıtan, arabalarımızı çalıştıran ve günümüz endüstrisinin büyük bölümünü besleyen fosil yakıtlar halinde bugün hâlâ faydalanıyoruz. Antik doğal kuantum

* Bitkilerde fotosistem I ve II olmak üzere iki fotosistem bulunur.

teknolojisinden ders alacak modern insan teknolojisinin potansiyel faydaları muazzamdır.

O halde fotosentezde gürültü, göründüğü kadarıyla hem eksitonların tepkime merkezine sevkiyat verimini artırmak hem de güneşten kaynaklanan enerjiyi tepkime merkezine ulaşır ulaşmaz yakalamak amacıyla kullanılır. Ancak bir moleküler kusurdan (gürültü) bir kuantum erdemi yaratabilme becerisi fotosentezle sınırlı değildir. Üçüncü bölümde ele aldığımız deneylerde, enzimlerdeki proton tünelleme üzerinde çalışan Manchester Üniversitesi'nden Nigel Scrutton'ın grubu 2013 yılında bir enzimdeki atomları daha ağır izotoplarıyla değiştirmiştir. İzotop değişimi, proteinin moleküler yaylarına ek yük bindirerek farklı frekanslarda titreşmelerine (renkli gürültü) yol açmıştır. Araştırmacılar ağır izotoplu enzimde proton tünellemenin ve enzim etkinliğinin bozulduğunu bulmuşlardır[12] ki bu sonuç, doğal, hafif izotoplarla normal durumda, protein omurganın metronom benzeri salınımlarının tünellemeye ve enzim etkinliğine katkıda bulunduğunu düşündürmektedir. California Üniversitesi'nden Judith Klinman'ın grubu da başka enzimlerle benzer sonuçlar elde etmiştir.[13] Dolayısıyla gürültü, göründüğü kadarıyla fotosenteze rehberlik etmenin yanı sıra, enzim etkinliğini de artırmaktadır. Enzimlerin, gezegenimiz üzerindeki her canlının her hücresindeki her bir molekülü yapan yaşam motorları olduğunu hatırlayın. İyi titreşimler canlılığımızı sürdürmemizde önemli bir rol oynuyor olabilir.

Klasik fırtınanın kuantum sınırındaki yaşam

Gemi güvertesinde: şiddetli bir gök gürültüsü

William Shakespeare, *Fırtına,*
Perde I, sahne 1, açılıştaki sahne talimatı

Bu anlayışların herhangi biri Schrödinger'in yıllar önce yaşamın doğasıyla ilgili sorduğu soruya yanıt veriyor mu? Onun, yaşamın

yukarıdan aşağıya, organizmaların yüksek düzeyde örgütlenmiş yapılarından dipteki kuantum anakayasına doğru fırtınalı termodinamik okyanusunda düzen hâkimiyetinde bir sistem olduğu anlayışını zaten kabul etmiştik (şekil 10.1). En önemlisi, bu yaşam güçleri, kuantum düzeyindeki olayların makroskobik dünyada, tam da Pascual Jordan'ın 1930'larda öngördüğü gibi bir fark yaratacağı şekilde yer alır ve dengede durur. Kuantum âlemine karşı bu makroskobik duyarlılık yaşama özgüdür ve onun tünelleme, uyumluluk, dolanıklık gibi kuantum düzeyindeki fenomenleri, hepimiz için bir fark yaratacak şekilde kendi yararına kullanabilmesini sağlar.

Ama –ki bu önemli bir amadır– kuantum dünyasından faydalanmak, ancak uyumsuzluğun uzak tutulmasıyla mümkün olabilir. Aksi takdirde sistem kuantum özelliğini yitirir ve "düzensizlikten doğan düzen" kuralları gereğince tamamen klasik ya da termodinamik davranışlar sergiler. Bilim insanları uyumsuzluğu, kuantum tepkimelerini rahatsız edici "gürültü"ye karşı koruyarak savuşturmuştur. Bu bölümdeyse, yaşamın çok farklı bir strateji izlediğini gördük. Yaşam, gürültünün kuantum uyumunu engellemesine izin vermek yerine, kuantum âlemiyle olan bağlantısını korumak için gürültüyü kullanır. Altıncı bölümde yaşamı, kuantum düzeyindeki olaylara karşı duyarlı olsun diye hassas bir dengeye konmuş bir granit bloğa benzetmiştik. Az sonra açıklığa kavuşacak birtakım nedenlerden ötürü, metaforumuzda bir değişiklik yapıp granit blok yerine büyük bir yelkenliyle devam edelim.

Farazi yelkenlimizin dar karinası başlangıçta tersanedeki kuru havuzda, muntazam sıralanmış atomların oluşturduğu bir hat üzerinde hassas bir dengede durmaktadır. Gemimiz bu tehlikeli denge konumundayken, canlı bir hücredekine benzer şekilde, atomik karinada gerçekleşen kuantum düzeyindeki olaylara karşı duyarlıdır. Bir protonun tünellemesi, bir elektronun uyarılması ya da bir atomun dolanıklığı, belki de kuru havuzdaki hassas dengeyi değiştirerek bütün bir gemiyi etkileyebilir. Ancak gemi kaptanının, yelken açtıktan sonra geminin seyrine yardımcı olacak kuantum uyumu,

tünelleme, süperpozisyon ya da dolanıklık gibi hassas kuantum fenomenlerinden faydalanmanın zekice ve şaşırtıcı yollarını bulduğunu hayal edelim.

Ama hâlâ kuru havuzda olduğumuzu unutmayın, yani gemi henüz bir yere gitmiyor ve hassas denge durumundayken kuantum düzeyindeki fenomenlerden faydalanabildiği halde, riskli konumu onu, alabora olmasına yol açabilecek en hafif esintiye –belki de tek bir hava molekülünün dokunuşuna– karşı dahi korunmasız kılar. Mühendisin gemiyi dik tutma ve böylece karinasındaki kuantum olaylarına karşı duyarlılığını koruma sorununa yaklaşımı, gemiyi bir kutu içinde koruma altına alıp içerideki bütün havayı dışarı pompalamak yoluyla, başıboş bir molekülün bilardo topu misali çarparak geminin dengesini bozmasını engellemek olacaktır. Mühendis ayrıca bütün sistemi mutlak sıfır derecesine soğutacak, böylece moleküler titreşim dahi geminin hassas dengesini bozamayacaktır. Fakat becerikli kaptanların bildiği üzere gemiyi dik tutmanın bir yolu daha vardır: Gemi öncelikle türbülanslı termodinamik sulara indirilmelidir.

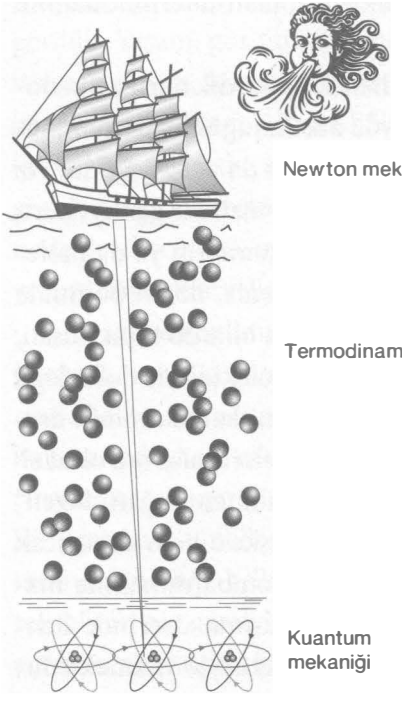
Geminin suda, karadakine göre daha kolayca dik durmasını doğal karşılarız, oysaki moleküler düzeyde düşündüğümüzde geminin stabilitesindeki artışın nedeni aslında o kadar da açık değildir. Az önce söylediğimiz gibi bir mühendisin dar karinalı bir gemiyi kuru havuzda dik tutma yaklaşımı, aracı başıboş atomların ya da moleküllerin olası tacizinden korumaktır. Ama deniz, ikinci bölümde incelediğimiz, birbirine ve geminin karinasına bilardo topu misali, gelişigüzel çarpıp duran başıboş atomlar ve moleküllerle dolu değil midir? Dengesi her an bozulabilecek olan gemi karada minik darbelerle devrilirken, suda nasıl olur da bu darbelerle alabora olmaz?

Yanıt Schrödinger'in tarif ettiği "düzensizlikten doğan düzen" kurallarından gelir. Gemi gerçekten de hem iskele hem de sancak tarafından trilyonlarca moleküler darbenin bombardımanına maruz kalacaktır. Artık elbette ultra-ince karinasının üzerinde dengede durmayıp, suyun kaldırma kuvvetinin etkisiyle yüzmektedir;

geminin her iki yanından gelen böylesine çok sayıda darbeyle pruva ve kıça ya da iskele ve sancağa etki eden ortalama kuvvet aynı olacaktır. Yüzen gemilerin devrilmeme nedeni trilyonlarca gelişigüzel moleküler darbenin bombardımanı tarafından ayakta tutulması, yani düzensizlikten (bilardo topu benzeri gelişigüzel trilyonlarca moleküler darbe) doğan düzendir (geminin dik durması).

Ama gemiler açık denizde bile alabora olabilir elbette. Diyelim ki kaptan gemisinin fırtınalı denize indirdi ama henüz yelken açmadı. Artık gemiye çarpan dalgalar o kadar da gelişigüzel değildir ve geminin o ya da bu yanından yükselen büyük dalgalar dengesiz bir aracı kolayca alabora edebilir. Ama akıllı kaptanımız gemisinin istikrarını nasıl artıracağını bilir: Yelken açarak, gemiyi karinası üzerinde tutabilecek olan rüzgâr gücünden faydalanır (Şekil 10.2).

Yine de bu strateji ilk başta çelişkili görünebilir. Rastgele esen rüzgârların ve öngörülemez fırtınaların, özellikle de gelişigüzel



Şekil 10.2: Yaşam kuantum dünyasıyla klasik dünyanın sınırında seyreder. Canlı hücre, dar karinası doğrudan gerçekliğin kuantum katmanına nüfuz eden ve böylece canlılığını korumak için tünelleme ya da dolanıklık gibi fenomenleri elinde tutan bir gemiye benzer. Kuantum uyumunu bozmaksızın sürdürebilmek için kuantum diyarıyla olan bu bağlantının, canlı hücreler tarafından termodinamik fırtınalardan (moleküler gürültü) faydalanarak etkin biçimde korunması gerekir.

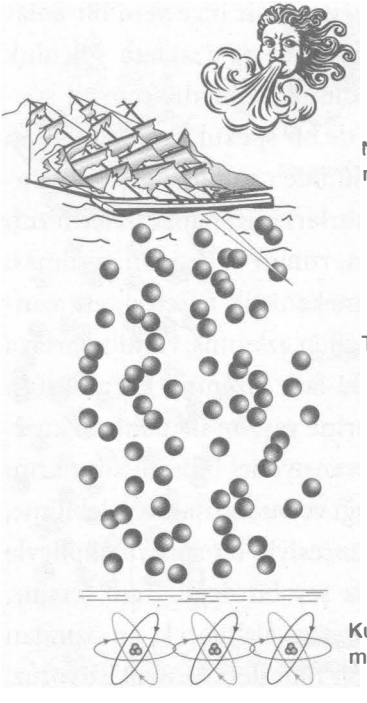
esmeyip geminin bir tarafına daha kuvvetli çarptığı için, zaten sallanan bir gemiyi dengeye getirmekten çok alabora etmesini bekleriz. Ama kaptan yelkenin ve yekenin açısını öyle ayarlar ki rüzgâr ile akıntıların etkisi fırtına ve boraya karşı koyarak yan yatan geminin duruşunu düzeltir. Böylece kaptan gemisini dengede tutmak için etrafı kasıp kavuran fırtınadan faydalanabilir.

Görünüşe göre yaşam, fırtınalı klasik sularda akıllı bir kaptanın kumandası altında seyreden metaforik gemimize benzer; neredeyse dört milyar yıllık evrimin keskinleştirdiği genetik program, kuantum diyarıyla klasik dünyanın farklı derinliklerinde seyredebilir. Yaşam fırtınalardan kaçmaz, tersine onları kucaklar; moleküler fırtına ve kasırgaları önüne katıp yelkenlerini doldurarak geminin dik durmasını ve böylece daracık karinası termodinamik suları yararken kuantum dünyasıyla bağlantı kurmasını sağlar (şekil 10.2). Yaşamın derinlerdeki kökleri onun, kuantum sınırında gezinen o tuhaf fenomenlerden faydalanmasını sağlar.

Peki bu, yaşamın gerçekte ne olduğuna dair bize yeni bir anlayış kazandırır mı? Aslında bu konuda, bu denli uzaklara yolculuk yaptıktan sonra sözünü etmekten kendimizi alamadığımız bir spekülasyon daha var ki bunun gerçekten de bir spekülasyon olduğunu özellikle vurgulamak isteriz. İkinci bölümde canlı ile cansız arasındaki farkın ne olduğunu sormuştuk hatırlarsanız; hani eskilerin ruh olarak tanımladığı fark. Onlar ölümün, ruhun bedenden ayrılması olduğuna inanıyorlardı. Descartes'ın mekanistik felsefesi, en azından bitkilerde ve hayvanlarda dirimselciliği azletmiş, ruhu ıskartaya çıkarmıştır ama canlı ile ölü arasındaki fark gizemini korumuştur. Yaşama dair yeni anlayışımız ruhun yerine yaşamsal kuantum kıvılcımını koyabilir mi? Pek çok kişi, konvansiyonel bilimin sınırlarını saygınlığını zedeleyecek ölçüde zorladığı ve bu sınırları sözdebilime, hatta bir tür tinselliğe kaydırdığı düşüncesiyle bu soruyu şüpheyle karşılayacaktır. Oysa öne sürdüğümüz şey bu değil. Tam tersine, mistik ve metafizik spekülasyonların yerini alabilecek, en azından özünde bilimsel bir kuram barındıran bir fikir ileri sürmek istiyoruz.

İkinci bölümde yaşamın yüksek düzeyde örgütlenmiş yapısını koruma kapasitesini, termodinamik benzeri bir sistemde, ortasındaki üçgende bulunan topların idamesi için, diğer topların çarpması sonucu fırlayanları saptayıp yerlerine yenisini koyan bir bilardo masası mekanizmasıyla karşılaştırmıştık. Artık yaşamın işleyişi konusunda çok daha fazlasını bildiğinize göre, bu kendinden sürdürülebilirliğin, kimi özellikleri tünelleme, uyumluluk ve dolanıklık gibi kuantum mekaniği fenomenlerine bağlı olan enzimler, pigmentler, DNA, RNA ve diğer biyomoleküllerden oluşan karmaşık bir moleküler mekanizma tarafından idame ettirildiğini anlayabilirsiniz.

Bu bölümde incelediğimiz yeni veriler, gemimizin hareketli güvertesindeki işler olarak da düşünebileceğimiz kuantum destekli muhtelif etkinliklerin kısmen ya da bütünüyle, yaşamın derinlerdeki kuantum diyarıyla olan bağlantısını sürdürebilmesini sağlayan termodinamik fırtınaları ve tayfunları dizginleyebilme



Şekil 10.3: Belki de ölüm, canlı organizmanın düzenli kuantum diyarıyla arasındaki bağlantının kopuşunu yansıtmakta ve rastgele termodinamik kuvvetlere direnmesi gereken yaşamı güçsüz düşürmektedir.

becerisi sayesinde devam ettirilebildiğini düşündürmektedir. Peki ama termodinamik fırtına fazla kuvvetli eserse ve metaforik geminin yelken direğini kırarsa ne olur? Termodinamik kasırgaları ve tayfunları –beyaz ve renkli gürültü– artık dizginleyemediği için gemiyi dik tutamayan yelkensiz kalmış hücreye dolan su metaforik gemimizin sallanmasına ve sonunda düzenli kuantum diyarıyla olan bağlantısının kopmasına neden olur (şekil 10.3). Bu bağlantı olmaksızın uyumluluk, dolanıklık, tünelleme ya da süperpozisyon hücrenin makroskobik davranışını etkileyemez; böylece kuantum bağlantısı kopan hücre termodinamik türbülanslı sulara gömülerek bütünüyle klasik bir nesne haline gelir. Gemi bir kez battıktan sonra hiçbir fırtına onu tekrar yüzdüremez; benzer şekilde belki de canlı bir organizma moleküler hareketin fırtınalı okyanusuna bir kez yakalandı mı, hiçbir fırtına onun kuantum bağlantısını yeniden kuramaz.

Yeni yaşam teknolojisinde kuantum biyolojisinden faydalanabilir miyiz?

Fırtınalar batan bir gemiyi yeniden yüzdüremeyebilir belki ama insan bunu yapabilir. İnsan zekâsı rastgele kuvvetlerin yapabileceğinden çok daha fazlasını başarabilir. Dokuzuncu bölümde, bir hurdalıkta bilinçsizce esen hortumun önüne çıkan parçalardan şans eseri bir jumbo jet yapabilme olasılığının yok denecek kadar az olduğunu görmüştük. Ama uçak mühendisleri uçak yapabilir. Yaşamı da inşa edebilir miyiz? Bu kitapta defalarca belirttiğimiz üzere, aktif olmayan kimyasallardan yaşam üretmeyi şimdiye kadar başarabilen çıkmadı ki bu, Richard Feynman'ın ünlü sözüne bakılırsa, yaşam fenomenini henüz tam olarak anlayamadığımız anlamına geliyor. Ama belki de yeni oluşmaya başlayan kuantum biyolojisi anlayışı bize yeni yaşam yaratmak, hatta devrimsel bir *yaşam teknolojisi* geliştirmek için gereken koşulları sağlayabilir.

Yaşam teknolojisine aşinayız elbette. Gıdamızı üretmek için tarımsal anlamda bütünüyle ona bağımlıyız. Un, süt, tahıl ve meyve suyunun maya ve bakteriler tarafından dönüştürülmesiyle oluşan ekmek, peynir, bira ve şarap gibi yaşam teknolojisi ürünlerine de bağımlıyız. Modern dünyamız, Mary Schweitzer'in dinozor kemiğini parçalamak için kullandığına benzer enzimler gibi, bir zamanlar canlı olan hücrelerin cansız ürünlerinden faydalanır. Benzer enzimler giysi kumaşlarının üretiminde, doğal lifleri parçalamak için kullanılır ya da o giysileri yıkamak için kullanılan biyolojik deterjanlara eklenir. Milyonlarca dolarlık biyoteknoloji ve farmakoloji endüstrisi, bizi enfeksiyonlardan koruyan antibiyotikler gibi yüzlerce doğal ürünün imalatında kullanılır. Enerji endüstrisi mikropların biyokütle fazlasını biyoyakıtlara dönüştürebilme becerisinden faydalanır; evlerimizi ısıtan, arabalarımızı çalıştıran fosil yakıtların yanı sıra modern hayatta kullandığımız kereste ve kâğıt gibi pek çok madde de bir zamanlar canlıydı. Sözün özü, yirmi birinci yüzyılda dahi binlerce yıllık eski yaşam teknolojimize olağanüstü bağımlıyız. En ufak bir şüpheniz varsa, Cormac McCarthy'nin, yaşam teknolojimizi pervasızca yok etmemiz halinde geride kalacak olan çıplak dünyayı tasvir ettiği *Yol* (*The Road*) adlı distopik romanını okuyun.

Ancak yaşam teknolojisinin de kendi sınırlılıkları vardır. Örneğin, daha önce gördüğümüz gibi fotosentezdeki bazı aşamalar son derece verimli olmasına rağmen, çoğu aşama öyle değildir ve tarımda güneş enerjisinin kimyasal enerjiye dönüşümünün toplam verimi çok düşüktür. Çünkü bitkilerin ve mikropların gündemi bizimkinden farklıdır, çiçek açma ve tohum verme gibi enerji tutma açısından çok da gerekli olmayan ama kendi yaşamları açısından elzem işlerle uğraşırlar. Benzer şekilde antibiyotikleri, enzimleri ya da farmasötikleri üreten mikroplar da bu işleri büyük bir israfla yapar, çünkü evrim tarafından belirlenmiş gündemleri onları bir yığın gereksiz şey yapmaya zorlar, daha fazla mikrop hücresi gibi.

Kendi gündemimize göre yaşam tasarlayabilir miyiz? Elbette yapabiliriz; insanlığın yabanıl bitkileri ve hayvanları evcilleştirerek

kendi çıkarına en uygun biçimde başarıyla dönüştürdüğü tarım ürünleri ve çiftlik hayvanlarından zaten büyük oranda faydalanıyoruz. Ancak çiftçiliğe uygun daha iri tohumlu bitkiler ve uysal hayvanlar elde etmemizi sağlayan yapay seçilimin, son derece başarılı olmasına rağmen kendi içinde sınırlamaları vardır. Doğanın henüz ortaya çıkarmadığı bir şeyin seçilimini yapamayız. Sözgelimi, yoğun tarımla toprağın kaybettiği azotu yerine koymak için her yıl milyarlarca dolarlık gübre kullanılmaktadır. Oysa bezelye gibi baklagiller azotlu gübreye ihtiyaç duymaz çünkü bu bitkilerin köklerinde, havadaki azot gazını tutan bakteriler bulunur. Baklagillerin bu özelliğine sahip, bezelye gibi azot tutabilen tahıllar üretebilseydik tarım çok daha verimli hale gelirdi. Ama tahıllarda bu beceri evrimleşmemiştir.

Ancak bu sınırlılık kısmen de olsa aşılabilir. Bitkilerin, mikropların, hatta hayvanların genetik manipülasyonu (genetik mühendisliği) yirminci yüzyılın sonlarına doğru büyük sıçrama yapmıştır. Günümüzde soya gibi başlıca ürünlerin çoğu, genetik mühendisliğiyle üretilmiş, hastalığa ya da herbiside dayanıklı bitkilerden elde edilmektedir ve tahıllara azot tutmayı sağlayan genlerin aktarılması gibi konular üzerinde çalışılmaktadır. Biyoteknoloji endüstrisi de farmasötiklerin ve antibiyotiklerin üretiminde benzer biçimde, genetik olarak değiştirilmiş mikroplara bel bağlamış durumdadır.

Öyle bile olsa yine de sınırlılıklar vardır. Genetik mühendisliği çoğunlukla genleri bir türden bir başkasına aktarmakla kalır. Örneğin, pirinç bitkisinde A vitamini (beta karoten) yapraklarda yapılır ama tohumda yapılmaz, dolayısıyla gelişmekte olan ülkeleri doyuran başlıca ürün olan pirinçte çok düşük miktarda A vitamini bulunur. A vitamini bağışıklık sistemimiz ve görme işlevimiz için elzemdir ve eksikliği, dünyanın pirince bağımlı en yoksul ülkelerinde her yıl milyonlarca çocuğun enfeksiyonlar nedeniyle ölmesine ya da kör kalmasına yol açar. 1990'lı yıllarda Freiberg Üniversitesi'nden Peter Beyer ve Zürih'teki İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'nden Ingo Potrykus, pirinç tohumlarını A vitamininden zenginleştirmek

amacıyla, biri zerrin bitkisinden diğeri bir mikroptan alınan iki geni genetik mühendisliğiyle pirinç genomuna aktardılar. Beyer'in *altın pirinç* olarak adlandırdığı ve ismini tohumların sarı renginden alan ürün günümüzde çocukların günlük A vitamini gereksiniminin büyük bölümünü karşılayabiliyor. Ancak genetik mühendisliği çok başarılı bir teknoloji olmakla birlikte, aslında tek yaptığı yaşamı kurcalamaktır. Yeni bir bilim olan *sentetik biyoloji* ise bütünüyle yeni yaşam biçimleri tasarlayarak yaşam teknolojisinde gerçekten de devrim yapmayı amaçlıyor.

Sentetik biyolojide birbirini tamamlayan iki yaklaşım bulunmaktadır. Yukarıdan-aşağıya yaklaşım, genom dizi analizi öncüsü Craig Venter'ın, mikoplazma denen bakterinin genomu yerine aynı genomun kimyasal yolla sentezlenmiş biçimini yerleştirerek "sentetik yaşam" oluşturduğunu anlatırken karşılaştığımız yaklaşımdı. Bu genom değiş tokuşu, ekibin, bütün mikoplazma genomu üzerinde nispeten ufak tefek değişiklikler yapmasını sağlamıştı. Ama yine de söz konusu olan bir mikoplazmaydı, bakterinin biyolojisinde kökten bir değişim olmamıştı. Venter'ın ekibi önümüzdeki yıllarda daha kökten değişiklikler yapmayı planlıyor, ancak bu değişiklikler sözünü ettiğimiz yukarıdan-aşağıya sentetik biyoloji yaklaşımıyla aşama aşama yapılacak. Ekip yeni bir yaşam biçimi oluşturmamış, sadece var olan yaşamda değişiklik yapmıştır.

Aşağıdan-yukarıya sentetik biyoloji olarak adlandırılan ikinci yaklaşımsa çok daha radikaldir; mevcut bir canlı organizmayı değiştirmekten çok, atıl kimyasallardan tamamen farklı yeni yaşam biçimleri oluşturmayı hedefler. Çoğu kişi böyle bir çabayı tehlikeli bulacak, hatta kutsal kavramlara saygısızlık olarak nitelendirecektir. Bunu yapmak gerçekten de mümkün mü? Diğer canlı organizmalar da tıpkı bizim gibi olağanüstü ayrıntılı makinelerdir. Herhangi bir makine gibi onların da tasarım ilkeleri tersine mühendislikle keşfedilebilir ve bu tasarım ilkelerinden faydalanarak daha iyi makineler yapılabilir.

Yaşamın aşağıdan-yukarıya inşası

Aşağıdan-yukarıya sentetik yaşam taraftarları, dünyamızı dönüştürebilecek bütünüyle yeni yaşam biçimleri oluşturmayı hayal ederler. Örneğin, günümüz mimarlarının kafası haklı olarak sürdürülebilirlik kavramıyla meşgul: sürdürülebilir evler, ofisler ve kentler. Ancak modern binalar ya da kentler genellikle kendini idame ettirebilen yapılar olarak nitelense de, bunlar çoğu zaman gerçek anlamda kendini idame ettirebilen varlıklara, insanlara bağımlıdır. Çatınızın kiremitleri fırtınada uçarsa yukarı tırmanıp çatıyı aktarabilecek bir usta bulursunuz; boru patlarsa tesisatçı çağırırsınız; arabanız bozulursa tamirciye çektirirsiniz. Esasen bütün bu bakım işlemleri, evlerimize ya da makinelerimize zarar veren rüzgâr, yağmur ya da diğer çevresel etkenlerden kaynaklanan bütün o bilardo topu benzeri moleküler itiş kakışın yarattığı hasarı onarabilmek için gereklidir.

Oysa yaşam farklıdır: Vücudumuz hasarlı ya da yıpranmış dokuları yenileyerek, yerine yenisini koyarak ve onararak kendini sürekli idame ettirir. Yaşadığımız sürece, gerçekten de kendi kendimizi idame ettirebilen varlıklarız. Modern mimari son yıllarda yapılan simge yapıların pek çoğunda yaşamın belli özelliklerini taklit etmeye çalışmıştır. Örneğin; Londra'nın siluetine 2003'te eklenen Norman Foster'ın "Gherkin" kulesinin, binanın gerilimini verimli biçimde dağıtan altıgen dış cephesi Venüs çiçek sepeti süngerinden (bir çiçek değil sünger türüdür) esinlenmiştir. Mick Pearce'in tasarladığı, Zimbabwe'nin Harare kentindeki Eastgate Centre'da havalandırma ve soğutma için termit yuvalarının havalandırma sistemi taklit edilmiştir. Greenwich Üniversitesi'nde çalışan mimari araştırma grubu AVATAR'ın eşbaşkanı Rachel Armstrong'un daha da cüretkâr bir vizyonu var: gerçek anlamda kendini idame ettiren yapılar, nihai biyometrik mimari. Diğer pek çok mimari vizyoner gibi Armstrong da, kendini idame ettirebilme, onarabilme, hatta kopyalayabilme becerisine sahip yapay canlı hücrelerden binalar inşa

etme hayalleri kuruyor.[14] Böyle canlı yapılar rüzgâr, yağmur ya da selden ötürü hasara uğrarlarsa, tıpkı canlı organizmalar gibi hasarı algılayıp kendilerini onarabilecekler.

Armstrong'un fikirleri yaşamımızda yeri olan diğer sentetik unsurları da kapsayacak şekilde genişletilebilir. Canlı materyal, tıpkı canlı doku gibi kendi kendini onarabilen, mikropların saldırısına karşı kendini koruyabilen yapay uzuv ya da eklemler gibi protezlerin yapımında da kullanılabilir. Hatta yapay yaşam formları, sözgelimi kanser hücrelerini bulup ortadan kaldırmak amacıyla insan vücuduna enjekte edilebilir. Farmasötikler, yakıtlar ve gıda, evrimsel geçmişi olmayan, özel olarak tasarlanmış sentetik yaşam biçimleri tarafından üretilebilir. Geleceğe dair bilimkurgu vizyonunda toplumdaki vasıfsız işleri üstelenen, hatta Mars'ı insanların koloni kurabileceği yaşanabilir bir gezegen haline getiren canlı robotlar ve androidler ya da galaksiyi keşfe çıkabilecek canlı uzay gemilerinin inşası vardır.

Aşağıdan-yukarıya sentetik yaşam yaratma fikrinin izlerini yirminci yüzyılın başlarına, Fransız biyolog Stéphane Leduc'ün yazdığı "nasıl ki sentetik kimya en basit organik ürünlerin yapay yoldan oluşturulmasıyla başladıysa, biyolojik sentez de ilk başta en aşağı seviyedeki organizmaları temsil eden yaşam formlarının üretimiyle yetinmek zorundadır" ifadesine dek sürebiliriz.[15] Dokuzuncu bölümde, günümüzde yaşayan "en aşağı seviyedeki" organizmaların dahi aslında bugün hayal edilebilecek hiçbir aşağıdan-yukarıya yaklaşımla sentezlenemeyen binlerce parçadan oluşmuş olağanüstü karmaşık bakteriler olduğunu gördük. Yaşam, bir bakteriden çok daha basit bir şeyle başlamış olmalı. İlk atamıza dair bugün elimizdeki en iyi tahmin, aynı bölümde sözünü ettiğimiz, kendi kendini kopyalayabilen enzimatik RNA (ribozimler) ya da protein moleküllerinin bir tür küçük kesecikle sarılarak oluşturduğu *ön-hücre* denen, kendi kendini kopyalayabilen basit hücre yapısıdır. Gerçekten var oldularsa bile ilk ön-hücrelerin yapısı hiç bilinmemektedir. Birçok bilim insanı, ön-hücrelerin, dokuzuncu bölümde karşılaştığımız Isua

kayaçları gibi kayalardaki, yaşamı destekleyebilecek basit biyokimyasallarla dolu mikroskobik gözeneklerde barınmış olduğuna inanıyor. Diğerleriyse bunların ilkel okyanusta yüzen, bir tür zarla sarılı biyokimyasal madde baloncukları ya da damlacıkları olduğunu düşünüyor.

Aşağıdan-yukarıya sentetik yaşam yaklaşımını benimseyenlerin çoğu yaşamın kökeniyle ilgili kuramlardan esinlenerek, laboratuvar koşullarında oluşturulmuş ilkel deniz ortamında yüzebilen yapay ön-hücreler üretmeye çalışıyorlar. Bunların en basit biçimi muhtemelen su içinde yağ veya yağ içinde su damlacıkları ya da kesecikleridir. Bunları yapmak son derece kolaydır, salata sosu hazırlarken bunlardan milyonlarcasını üretirsiniz. Bildiğiniz gibi yağla su birbirine karışmadığı için çabucak ayrışıverir ama molekülleri su ile yağ arasına gömülen, hardal gibi bir *sürfaktan* ekleyip karışımı iyice çalkalarsanız salata sosu yapabilirsiz. Bu karışım gayet pütürsüz ve homojen görünse de gerçekte trilyonlarca minicik yağ damlacığıyla doludur.

Güney Danimarka Üniversitesi'nden Martin Hanczyc, su içinde deterjanla stabilize edilmiş yağ damlacıklarından olağanüstü derecede canlıya benzeyen ön-hücreler oluşturmuştur. Ürettiği ön-hücre çok basit olup çoğunlukla sadece beş kimyasaldan oluşmaktadır. Doğru oranlarda karıştırıldığında bu kimyasallar kendiliğinden yağ damlacıkları şeklinde birleşir. Damlacıkların içi, konveksiyonla (ısının dolaşımı) ve başlangıçta yağ damlacıklarının birleşmesine neden olan türde kimyasal kuvvetlerle ön-hücrenin ortamın içinde hareket etmesine neden olan basit bir kimyayı destekler. Hatta ön-hücreler içinde bulundukları ortamdan hammadde soğurup bu nedenle nihayet ikiye yarılmak suretiyle basit bir büyüme ve kendini kopyalama sürecinden geçebilir.[16]

Hanczyc'in ön-hücrelerinin yağlı bir iç ortamı olup dışında da su bulunduğundan, bunlar canlı hücrelerle karşılaştırıldığında ters yüz edilmiş gibidir. Diğer araştırmacıların çoğu içerisinde su olan ön-hücreleri yeğliyor. Bu özellik onlara, ön-hücreleri suda

çözünebilir hazır biyomoleküllerle doldurma olanağı tanıyor. Örneğin, 2005 yılında genetikçi Jack Szostak ön-hücreleri RNA ribozimlerle doldurdu.[17] Dokuzuncu bölümden hatırlarsanız ribozimler, tıpkı DNA gibi genetik bilgi kodlayabilen ama aynı zamanda enzim aktivitesi gösteren RNA molekülleriydi. Ekip, ribozimle doldurulan ön-hücrelerin basit bir kalıtım biçimi sergilediğini, Hanczyc'in ön-hücresi gibi ikiye bölünebildiğini gösterdi. 2014 yılında, Hollanda Radboud Üniversitesi'nden Sebastien Lecommandoux öncülüğünde bir ekip, başka türde bir ön-hücre yapıp bunun çok sayıdaki kompartımanını, canlı hücrelerdeki gibi bir kompartımandan diğerine kademeli ilerleyen basit bir metabolizmayı destekleyebilecek enzimlerle doldurdu.[18]

Bu dinamik ve kimyasal olarak aktif ön-hücreler kesinlikle merak uyandıran, etkileyici yapılardır ama bunlar yaşam mıdır? Bu soruya yanıt vermek için yaşamın pratik bir tanımı üzerinde fikir birliğine varmalıyız. En aşikâr özellik olan kendini kopyalama, pek çok açıdan uygun gibi görünmekle birlikte beklentisi çok fazladır. Erişkin vücudundaki alyuvarlar ve sinir hücreleri gibi hücrelerin çoğu kendini kopyalamadıkları halde canlı oldukları su götürmez. Hatta insan vücudunu bütün olarak ele aldığımızda, Budist ya da Katolik rahipler (genellikle) kendini kopyalama gibi karışık işlerle uğraşmasalar da gayet canlıdırlar. O halde kendini kopyalama bir türün uzun süre hayatta kalması için elbette gereklidir ama yaşamın olmazsa olmaz özelliklerinden biri değildir.

Yaşamın kendini kopyalamadan çok daha temel bir özelliği daha önce üzerinde durduğumuz, biyomimetik mimarların imrendiği kendi kendini idame ettirebilmedir. Yaşam, canlılığı sürdürebilme becerisine sahiptir. O halde aşağıdan-yukarıya tasarlanmış ön-hücrelerimizin canlı olarak sınıflanması için gereken asgari koşul, kendilerini termodinamik denizlerin türbülanslı sularında idame ettirebilmeleridir.

Ne yazık ki, yaşamın bu daha sınırlı tanımını kullandığımızda, mevcut ön-hücre kuşağında canlı diyebileceğimiz bir örnek

yoktur. Basit bir replikasyon (ikiye bölünme) gibi birkaç numara becerebilenler dahi, ebeveynlerine benzer yavrular üretememektedir. Yavrulara düşen bileşenler, mesela ribozimler ya da enzimler, başlangıçta olandan daha azdır; bu nedenle replikasyon süreci ilerledikçe bu bileşenler eninde sonunda tükenir. Benzer şekilde, Lecommandoux'nun grubu tarafından yapılan ön-hücreler, basit bir canlı organizmanın metabolizmasını destekleyebilir nitelikte olmakla birlikte, kendi başlarına ikmal edemedikleri aktif biyomoleküllerle sürekli doldurulmak zorundadır. Günümüzün ön-hücre kuşağı kurulu saate benzer: Önceden hazırlanmış enzimler ve substratlarla desteklendiği takdirde, başlangıçtaki kimyasal durumunu idame ettirebilir, ta ki elindekiler tükenene kadar. Sonrasında etraftaki moleküler hareketten kaynaklanan moleküler yumruklar ön-hücrelerin organizasyonunu aşındırdığı için bu yapılar giderek daha kaotik ve rastgele hale gelir ve en sonunda içinde bulundukları ortamla aralarında bir fark kalmaz. Yapay ön-hücreler, yaşamdan farklı olarak, kendilerini yeniden kurma özelliğine sahip değildir.

Ön-hücrelerin yapımında içerikte atlanan bir şey mi var? Bu alan henüz çok yeni elbette ve muhtemelen önümüzdeki yıllar içinde önemli aşamalar kaydedilecek. Kitabımızın son bölümünde irdelemek istediğimiz konu, kuantum mekaniğinin, yapay yaşamı canlandırmak ve gerçekten sentetik yaşam üretebilmek için gereken eksik kıvılcımı sağlayabileceği fikridir. Böylesi bir ilerleme, devrim yaratan bir teknolojiyi başlatmanın yanı sıra bize sonunda ikinci bölümde sorduğumuz şu çok eski sorunun yanıtını da verebilir: Yaşam nedir?

Biz ve başka bilim insanları, yaşamın kuantum dünyasının özelliklerinden faydalanabilme becerisini dahil etmediği için yaşamın termodinamik tanımının yetersiz kaldığını savunuyoruz. Bizce yaşam, kuantum mekaniğine dayanmaktadır. Peki ama haklı mıyız? Bunu günümüz teknolojisiyle kanıtlamanın zor olduğundan zaten söz etmiştik, çünkü canlı bir hücrede kuantum mekaniğinin düğmesini açıp kapayamazsınız. Bununla birlikte biz, ister doğal olsun

ister yapay, yaşamın kuantum dünyasının bu kitapta anlattığımız garip özellikleri olmaksızın var olamayacağını öngörüyoruz. Haklı olup olmadığımızı anlamanın tek yolu, sentetik yaşamı kuantum garipliği yardımıyla ve (eğer mümkünse) o olmaksızın üretip, sonra da hangisinin daha iyi işlediğine bakmaktır.

İlkel kuantum ön-hücrenin başlangıcı

Tamamen cansız malzemeler kullanarak laboratuvar ortamında oluşturulmuş bir tür ilkel denizde, sözgelimi kendi besinini bulmak gibi basit işlevler gerçekleştirebilen basit bir canlı hücre oluşturduğumuzu hayal edelim. Amacımız, bu basit hücreyi iki farklı şekilde oluşturmak. Ön-hücrelerden biri kuantum mekaniğinin tuhaf özelliklerinden faydalanırken (buna *kuantum ön-hücre* diyeceğiz), diğeri bunu yapmayacak (buna da *klasik ön-hücre* diyeceğiz).

Sebastien Lecommandoux'nun ürettiği, farklı bölümleri yaşamın ayrı işlevlerini ayrı kompartımanlara bölmemize izin veren çok kompartımanlı, zarla sarılı ön-hücreleri her ikisi için de iyi bir başlangıç olacaktır. Ardından ön-hücremize bir enerji kaynağı temin etmemiz gerek. Bol miktarda bulabileceğimiz yüksek enerjili fotonları, güneş ışığını kullanalım. Ön-hücrenin kompartımanlarından birini, bir pigment molekülü ve iskele proteini ormanıyla doldurarak, yapay bir kloroplast gibi fotonları yakalayıp onların enerjisini eksitonlara dönüştürebilecek bir tür güneş paneli oluşturuyoruz. Ancak karmakarışık pigment moleküllerinin, fotosentezin yüksek verimli enerji taşınmasını gerçekleştirmesi pek olası değil, zira bu moleküler karmaşa verimli bir enerji taşınması için gereken kuantum uyumunu sürdüremeyecektir. Kuantum vuruyu yakalayabilmek için pigment moleküllerini, uyumlu dalganın sistemin içinden akabileceği şekilde yönlendirmemiz gerekir.

2013 yılında, kuantum fotosentez alanında öncü isimlerden Greg Engel liderliğinde Chicago Üniversitesi'nden bir grup, pigment moleküllerini sabit bir sıralamayla kimyasal olarak birbirine

sürgüleyerek bu sorunu çözmeye çalıştı. Engel'in kuantum uyumunu ilk kez saptadığı alglerdeki FMO kompleksi gibi (dördüncü bölüm), oluşturdukları yapay pigment sistemi de, oda sıcaklığında dahi onlarca femtosaniye devam eden uyumlu kuantum vuruları gösteriyordu.[19] Dolayısıyla kuantum ön-hücremizin güneş paneline kuantum uyumuyla desteklenmiş eksitonlar temin edebilmek için onu Engel'in birbirine sürgülenmiş pigment molekülleriyle dolduracağız. Klasik fotosel de aynı pigmentleri içerecek ama bunlar rastgele dizileceği için eksiton sistem içinde yolunu dolana dolana bulmak zorunda kalacak. Böylece kuantum uyumunun fotosentezde eksiton taşınması için vazgeçilmez olup olmadığını sınayabileceğiz.

Ancak daha önce de gördüğümüz gibi, ışığın yakalanması fotosentezin sadece ilk basamağıdır; bir sonraki aşamada bu kararsız eksiton enerjisini kararlı kimyasal enerjiye dönüştürmemiz gerek. Bu konuda da aşama kaydedildi. 2013 tarihli makalelerinde fotosentez tepkime merkezinin görünüşe göre bir kuantum ısı motoru olduğunu gösteren Scully'nin grubu, biyolojik kuantum ısı motorlarının daha verimli fotosellerin tasarımına esin kaynağı olabileceğini savundu.[20] Aynı yıl Cambridge Üniversitesi'nden bir ekip bu grubun savına istinaden, kuantum ısı motoru olarak çalışan yapay bir fotosel için detaylı bir taslak hazırladı.[21] Grup, Engel'in laboratuvarında yapılan sürgülü pigment molekülünden yapay bir tepkime merkezi modeli oluşturdu ve bunun, Scully ile grubunun doğal fotosentezde bulduğuna benzer şekilde Carnot limitini kıran verim artışıyla, enerji yüklü elektronu alıcı moleküle iletmesi gerektiğini gösterdi.

Şimdi de kuantum solar hücremizin, Cambridge ekibinin modelinden esinlenen yapay bir tepkime merkeziyle donatıldığını ve enerji yüklü elektronlardan kararlı kimyasal enerji elde edebildiğini varsayalım. Bir kez daha, benzer bir enerji transferini, Carnot limitini kıran kuantum verim söz konusu olmaksızın gerçekleştirebilecek klasik ön-hücremiz için rakip bir sistem tasarlayacağız. Işık enerjisi yakalandıktan sonra, hücrenin pigment molekülleri gibi karmaşık biyomoleküllerin yapımında kullanılabilir.

Ancak biyosentez tepkimeleri elektronların yanı sıra, hücrelerimizde solunumla sağlanan (üçüncü bölüm) ek bir enerji desteğine ihtiyaç duyar. Solunumdan esinlenerek, fotosentezde iletilen yüksek enerjili elektronların bir kısmını başka bir yola saptıracak, onları doğal solunum zincirlerinde olduğu gibi, hücrenin moleküler enerji taşıyıcısı olan ATP yapımı için bir enzimden diğerine tünelleme yapacakları bir "güç kaynağı" kompartımanına yönlendireceğiz. Bu kez amacımız solunum kompartımanını düzenleyerek kuantum mekaniğinin bu yaşamsal biyolojik süreçteki rolünü incelemek.

Bir elektron ve enerji kaynağıyla kuantum ön-hücremiz artık kendi biyokimyasallarının hepsini yapabilecek donanıma sahip ama bir hammadde kaynağına, yani besine ihtiyacı var. Biz de ona bir besin kaynağı, basit bir şeker, laboratuvarımızdaki ilkel deniz ortamında çözünmüş glukoz temin ediyoruz. Glukozu hücre içine pompalayacak ATP enerjisiyle çalışan şeker taşıyıcılarının yanı sıra, daha karmaşık biyomoleküller yapabilmek için atomlarını – kuantum düzeyinde mühendislikle– yönetebilen bir grup enzim yüklememiz gerekecek. Bu enzimlerin pek çoğu normalde üçüncü bölümde gördüğümüz gibi elektron ve proton tünelleme kullanır; ancak bizim amacımız, kuantum mekaniğinin bu yaşam motorları için gerçekten de elzem bir motor yağı olup olmadığını anlamak için, kuantum dünyasına dalma becerisi olan ve olmayan farklı versiyonlar üretebilmek.

Kuantum destekli ön-hücremizde bulunmasını isteyeceğimiz bir başka özellik ise kuantum uyumunu sürdürebilmek için, moleküler gürültü fırtınasını dizginleyebilme becerisidir. Bu özelliğin mühendisliğini yapabilmek için yaşamın bu numarayı nasıl becerdiğine dair şimdilik pek az bilgimiz var. İşin içine birçok etmen karışıyor olabilir. Örneğin, canlı hücrelerin aşırı derecede kalabalık moleküler ortamının pek çok biyokimyasal tepkimede değişim yarattığı[22] ve gürültünün rastgeleleştirici etkisini sınırlandırmaya yardımcı olabileceği biliniyor. O halde biz de ön-hücreleri, termodinamik fırtınaları ve kasırgaları dizginleyerek kuantum uyumunu

idame ettirmesi umuduyla bu kalabalık canlı ortamı taklit etmesi için biyomoleküllerle tıklım tıkış dolduruyoruz.

Ancak kuantum ön-hücremizin ihtiyaçları bitmiyor, bütün enzimlerinin önceden yüklenmiş olması gerek. Yapıyı kendine yetebilir hale getirmek için bir kompartıman daha eklemeliyiz: gereksinim duyduğu her şeyi kodlayabilecek yapay bir DNA esaslı genom ile kuantum düzeyindeki proton kodunu proteinlere çevirmek için gereken mekanizmayı içeren kumanda odası. Bu, Craig Venter'ın kullandığı yukarıdan-aşağıya yaklaşıma benziyor; tek fark genomu *canısız* ön-hücremize enjekte edecek olmamız. Son olarak, ön-hücremize bir navigasyon sistemi, belki de beşinci bölümde incelediğimiz koku reseptöründe kuantum dolanıklığı ilkesini kullanarak besinin yerini bulmasını sağlayacak bir moleküler burun ve ilkel denizde hareket etmesini sağlayacak bir moleküler motor bahşedebiliriz. Hatta onu, kızılgerdanımızda olduğu gibi kuantum gücüyle çalışan ve laboratuvar ortamındaki ilkel denizde konumunu belirlemesini sağlayan bir navigasyon sistemiyle donatabiliriz

Tarif ettiğimiz şey, Shakespeare'in Ariel'ından daha gerçek olmayan bir biyolojik garipliktir. Basitlik ve anlaşılabilirlik adına çok fazla detayı atladık, gerçek bir aşağıdan-yukarıya sentetik biyoloji projesinde karşılaşacağımız aşılması zor engellerden bahsetmedik. Böyle bir projeye kalkışılsaydı bile, bütün bu süreçler elbette yukarıdaki farazi tarifimizde olduğu gibi tek bir basamakta somutlaştırılmayacak, öncelikle en basit ya da en iyi anlaşılan sürecin –belki fotosentezin– ön-hücrede kurulması denenecekti. Hiç kuşkusuz sadece bu bile kendi içinde büyük bir başarı ve kuantum uyumunun fotosentezdeki rolünü araştırmak için kullanılabilecek mükemmel bir model olacaktır. Böylesi bir başarı mümkün olursa, sonraki aşamalar karmaşıklığı gittikçe artıracak şekilde yeni bileşenler eklemek olacak ve belki de sonunda hakikaten bir yapay canlı hücre elde edilecektir. Ancak bunun sadece ve sadece yaşama giden kuantum yolu boyunca mümkün olabileceğini öngörüyoruz. Kuantum diyarıyla bağlantı olmaksızın yaşamın işlemeyeceğine inanıyoruz.

Böyle bir proje hayata geçirilmeye çalışılırsa, sonunda yeni yaşamı oluşturmak mümkün olabilecektir belki de. Böylesi bir ilerleme yaşam teknolojisinde gerçekten de devrim yaratabilir: kuantum dünyasıyla klasik dünya sınırında seyreden yapay yaşam. Gerçekten de sürdürülebilir canlı binalarda tuğla olarak kullanılacak yapay canlı hücreler tasarlanabilir; hasarlı ve yıpranmış dokularımızı onaracak ve yenileyecek mikrocerrahlar oluşturulabilir. Kuantum biyolojisinin, fotosentezden enzim etkisine ve kuantum burunlardan kuantum genomlara, kuantum pusulalara hatta kuantum beyinlere dek bu kitapta incelediğimiz muhteşem özelliklerinin hepsinden, kuantum sentetik canlı organizmalardan oluşan ve doğal akrabalarını insanlığın ihtiyaçlarını temin etme angaryasından kurtaran bir cesur yeni dünyanın inşasında faydalanılabilir.

Ama belki daha da önemlisi, yoktan yeni yaşam var etmenin biyoloji disiplinine, Feynman'ın ünlü "yapamadığım şeyi anlamamışımdır" sözüne verecek bir yanıt sağlaması olacaktır. Eğer böyle bir proje gerçekten de başarıya ulaşırsa, o zaman nihayet yaşamı ve onun kaos kuvvetlerini kullanarak klasik dünyayla kuantum dünyası arasındaki daracık sınırda seyredebilme becerisini anladığımızı iddia edebiliriz.

Sizin yardımınızla kara çaldım öğle güneşine,
Göreve çağırdım karşı duran rüzgârları,
Yeşil denizlerle mavi gökleri
Hararetli bir kavgaya tutuşturdum;
Gümbürdeyen, korku veren fırtına bulutuna ateş verdim.

William Shakespeare,
Fırtına, V. perde, 1. sahne*

* Bu terim genellikle uyumsuz moleküler titreşimleri tarif etmek için kullanılır.

Sonsöz: kuantum yaşam

BİRİNCİ BÖLÜMDE TANIŞTIĞIMIZ Avrupa kızılgerdanı kışı Akdeniz güneşi altında atlattıktan sonra şimdi bir yandan Tunus'taki Kartaca antik kalıntılarıyla seyrek ormanlık arazi arasında hoplaya zıplaya geziniyor, bir yandan da bitkiler ve mikroplar olarak adlandırdığımız, kuantum enerjisiyle çalışan fotosentez makineleri tarafından hava ve ışıktan üretilmiş biyokütlenin parçası olan sinekler, kınkanatlılar, solucanlar ve tohumlarla semiriyor. Ama güneş öğlen vakti tam tepeye yükseliyor, kavurucu sıcak ormanlık arazinin içinden geçen bütün sığ akarsu yataklarını kurutmuş. Orman Avrupalı ötücü kuşumuz için fazlasıyla kurak ve yaşanması zor bir yer artık. Yani yola çıkma zamanı geldi.

Minik kuş günün geç saatlerinde uçup bir sedir ağacının üst dalına tünüyor. Aylar önce yaptığı gibi tüylerini itinayla düzeltiyor, bir yandan da kendisi gibi uzun bir uçuşa hazırlanma dürtüsüyle öten diğer kızılgerdanların çağrılarına kulak veriyor. Günün son ışıkları ufukta yitip giderken kızılgerdan gagasını kuzeye doğru çeviriyor, kanatlarını açıyor ve karanlık basan gökyüzüne doğru yükseliyor.

Kızılgerdan, kanatlı pusulasının kuantum dolanık ibresi kılavuzluğunda altı ay önce izlediği rotayı bu kez ters yönde takip ederek Kuzey Afrika kıyısına doğru uçuyor ve Akdeniz'i aşarak yoluna devam ediyor. Her kanat çırpışı, elektronların ve protonların solunum enzimleri yoluyla yaptığı kuantum tünellemeden gelen enerjiyle kasılan kas liflerinin hareketine bağlı. Saatler sonra İspanya

kıyılarına varan kızılgerdan, Endülüs'te ormanlık bir nehir vadisine iniyor ve hepsi de kuantumla çalışan fotosentezin ürünü olan söğüt, akçaağaç, karaağaç, kızılağaçların, meyve ağaları ve çiçekli çalıların bulunduğu bu zengin bitki örtüsünün ortasında dinleniyor. Koku molekülleri burun deliklerinden girip koku reseptörlerine bağlanarak kuantum tünelleme olaylarını başlatıyor; yolculuğunun bir sonraki evresi için kendisine ek gıda sağlayacak olan lezzetli arıların ve diğer tozlaştırıcı böceklerin üzerinde dolanıp durduğu narenciye çiçeklerinin yakınlarda olduğu mesajını iletecek sinir sinyalleri kuantum uyumlu iyon kanalları aracılığıyla beynine ulaşıyor.

Günlerce süren uçuşun ardından kızılgerdan aylar önce ayrıldığı İskandinav ladin ormanına dönüyor. İlk iş kendine bir eş arıyor. Ormana birkaç gün önce gelip yuva yapacakları uygun bir yer bulan erkek kızılgerdanların çoğu şimdi ötüşleriyle dişileri o yuvalara çekmeye çalışıyor. Bizim kızılgerdan da pek ahenkli öten bir kuşun cazibesine kapılıyor ve kur yapma ritüelinin bir parçası olarak erkeğin topladığı lezzetli yiyeceklerin tadını çıkarıyor. Kısa süren bir çiftleşmenin ardından erkeğin spermi dişinin yumurta hücresiyle birleşiyor ve kuş çiftinin biçimsel, yapısal, biyokimyasal, fizyolojik ve anatomik özelliklerini, hatta ötüşünü kodlayan, kuantum esasına dayanan genetik bilgi, bir sonraki kızılgerdan kuşağına kusursuz biçimde aktarılıyor. Bu sırada gerçekleşen birkaç kuantum tünelleme hatasıysa, türün gelecekteki evrimi için gereken hammaddeyi sağlayacak.

Önceki bölümlerde vurguladığımız gibi, az önce tarif ettiğimiz bütün özelliklerin kuantum mekaniğine dayalı olup olmadığını henüz kesinkes bilmiyoruz elbette. Ancak kızılgerdanlar, palyaço balıkları, kral kelebekleri, sirkesinekleri, bitkiler, mikroplar, Antarktika buzunun altında yaşayan bakteriler, Jura devri ormanlarında hüküm sürmüş dinozorlarla ilgili muhteşem ve eşsiz olan ne varsa, çoğunun köklerinin tıpkı bizimkiler gibi kuantum dünyasına uzandığı gerçeğine dair şüphemiz yok. Keşfedilmeyi bekleyen pek çok

şey var hâlâ ama her yeni araştırma alanının güzelliği, bilinmeyenden başkası değildir. Isaac Newton'un da dediği gibi:

> Dünyanın gözüne nasıl göründüğümü bilmiyorum ama ben kendimi, deniz kıyısında oynayan, arada bir daha pürüzsüz bir çakıl taşı ya da sıradan olanlara göre daha güzel bir deniz kabuğu bularak oyalanan bir çocuk olarak görüyorum ve bu sırada uçsuz bucaksız gerçekler denizi önümde keşfedilmemiş, bekliyor.

Notlar

Bölüm 1: Giriş

1 P. W. Atkins, "Magnetic field effects", *Chemistry in Britain*, cilt 12 (1976), s. 214.

2 S. Emlen, W. Wiltschko, N. Demong ve R. Wiltschko, "Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings", *Science*, cilt 193 (1976), s. 505-8.

Bölüm 2: Yaşam nedir?

1 S. Harris, "Chemical potential: turning carbon dioxide into fuel", *The Engineer*, 9 Ağustos 2012, http://www.theengineer.co.uk/energy-an-denvironment/in-depth/chemical-potential-turning-carbon-dioxide-intofuel/1013459.article#ixzz2upriFA00.

2 *Die Naturwissenschaften*, cilt 20 (1932), s. 815-21.

3 Pascual Jordan'dan alıntı, 1938. P. Galison, M. Gordin ve D. Kaiser (Ed.), *Quantum Mechanics: Science and Society* (Londra: Routledge, 2002), s. 346.

4 H. C. Longuet-Higgins, "Quantum mechanics and biology", *Biophysical Journal*, cilt 2 (1962), s. 207-15.

5 M. P. Murphy ve L. A. J. O'Neil (Ed.), *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology* (Cambridge: Cambridge University Press, 1995).

Bölüm 3: Yaşamın motorları

1 R. P. Feynman, R. B. Leighton ve M. L. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1964), cilt 1, s. 3-6.

2 M. H. Schweitzer, Z. Suo, R. Avci, J. M. Asara, M. A. Allen, F. T. Arce ve J. R. Horner, "Analyses of soft tissue from Tyrannosaurus rex suggest the presence of protein", *Science*, cilt 316: 5822 (2007), s. 277-80.

3 J. Gross, "How tadpoles lose their tails: path to discovery of the first matrix metalloproteinase", *Matrix Biology*, cilt 23: 1 (2004), s. 3-13.
4 G. E. Lienhard, "Enzymatic catalysis and transition-state theory", *Science*, cilt. 180: 4082 (1973), s. 149-54.
5 C. Tallant, A. Marrero ve F. X. Gomis-Ruth, "Matrix metalloproteinases: fold and function of their catalytic domains", *Biochimica et Biophysica Acta (Molecular Cell Research)*, cilt 1803: 1 (2010), s. 20-8.
6 A. J. Kirby, "The potential of catalytic antibodies", *Acta Chemica Scandinavica*, cilt 50: 3 (1996), s. 203-10.
7 Don DeVault ve Britton Chance, "Studies of photosynthesis using a pulsed laser: I. Temperature dependence of cytochrome oxidation rate in chromatium. Evidence for tunneling", *BioPhysics*, cilt 6 (1966), s. 825.
8 J. J. Hopfield, "Electron transfer between biological molecules by thermally activated tunneling", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 71 (1974), s. 3640-4.
9 Yuan Cha, Christopher J. Murray ve Judith Klinman, "Hydrogen tunnelling in enzyme reactions", *Science*, cilt 243: 3896 (1989), s. 1325-30.
10 L. Masgrau, J. Basran, P. Hothi, M. J. Sutcliffe ve N. S. Scrutton, "Hydrogen tunneling in quinoproteins", *Archives of Biochemistry and Biophysics*, cilt 428: 1 (2004), s. 41- 51; L. Masgrau, A. Roujeinikova, L. O. Johannissen, P. Hothi, J. Basran, K. E. Ranaghan, A. J. Mulholland, M. J. Sutcliffe, N. S. Scrutton ve D. Leys, "Atomic description of an enzyme reaction dominated by proton tunneling", *Science*, cilt 312: 5771 (2006), s. 237-41.
11 David R. Glowacki, Jeremy N. Harvey ve Adrian J. Mulholland, "Taking Ockham's razor to enzyme dynamics and catalysis", *Nature Chemistry*, cilt 4 (2012), s. 169-76.

Bölüm 4: Kuantum vuru

1 BBC TV dizisi *Fun to Imagine 2: Fire* (1983), YouTube erişim adresi: http://www.youtube.com/watch?v=ITpDrdtGAmo.
2 CBC News röportajı, erişim adresi: http://www.cbc.ca/news/technology/quantum-weirdness-used-by-plants-animals-1.912061.
3 G. S. Engel, T. R. Calhoun, E. L. Read, T-K. Ahn, T. Mančal, Y-C. Cheng, R. E. Blankenship ve G. R. Fleming, "Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems", *Nature*, cilt 446 (2007), s. 782-6.

4 I. P. Mercer, Y. C. El-Taha, N. Kajumba, J. P. Marangos, J. W. G. Tisch, M. Gabrielsen, R. J. Cogdell, E. Springate ve E. Turcu, "Instantaneous mapping of coherently coupled electronic transitions and energy transfers in a photosynthetic complex using angle-resolved coherent optical wave-mixing", *Physical Review Letters*, cilt 102: 5 (2009), s. 057402.
5 E. Collini, C. Y. Wong, K. E. Wilk, P. M. Curmi, P. Brumer ve G. D. Scholes, "Coherently wired light-harvesting in photosynthetic marine algae at ambient temperature", *Nature*, cilt 463: 7281 (2010), s. 644-7.
6 G. Panitchayangkoon, D. Hayes, K. A. Fransted, J. R. Caram, E. Harel, J. Wen, R. E. Blankenship ve G. S. Engel, "Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 107: 29 (2010), s. 12766-70.
7 T. R. Calhoun, N. S. Ginsberg, G. S. Schlau-Cohen, Y. C. Cheng, M. Ballottari, R. Bassi ve G. R. Fleming, "Quantum coherence enabled determination of the energy landscape in light-harvesting complex II", *Journal of Physical Chemistry B*, cilt 113: 51 (2009), s. 16291-5.

Bölüm 5: Nemo'nun yuvasını bulmak

1 Mısır'dan çıkış 30: 34-5.
2 A. Le Guerer, *Scent: The Mysterious and Essential Power of Smell* (New York: Kodadsha America Inc., 1994), s. 12.
3 R. Eisner, "Richard Axel: one of the nobility in science", *P&S Columbia University College of Physicians and Surgeons*, cilt 25: 1 (2005).
4 C. S. Sell, "On the unpredictability of odor", *Angewandte Chemie, Uluslararası Basım* (İngilizce), 45: 38 (2006), s. 6254-61.
5 K. Mori ve G. M. Shepherd, "Emerging principles of molecular signal processing by mitral/tufted cells in the olfactory bulb", *Seminars in Cell Biology*, cilt 5: 1 (1994), s. 65-74.
6 L. Turin, *The Secret of Scent: Adventures in Perfume and the Science of Smell* (Londra: Faber & Faber, 2006), s. 4.
7 L. Turin, "A spectroscopic mechanism for primary olfactory reception", *Chemical Senses*, cilt 21: 6 (1996), s. 773-91.
8 Turin, *The Secret of Scent*, s. 176.
9 C. Burr, *The Emperor of Scent: A True Story of Perfume and Obsession* (New York: Random House, 2003).
10 A. Keller ve L. B. Vosshall, "A psychophysical test of the vibration theory of olfaction", *Nature Neuroscience*, cilt 7: 4 (2004), s. 337-8.

11 M. I. Franco, L. Turin, A. Mershin ve E. M. Skoulakis, "Molecular vibration-sensing component in *Drosophila melanogaster* olfaction", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 108: 9 (2011), s. 3797-802.
12 J. C. Brookes, F. Hartoutsiou, A. P. Horsfield ve A. M. Stoneham, "Could humans recognize odor by phonon assisted tunneling?", *Physical Review Letters*, cilt 98: 3 (2007), s. 038101.

Bölüm 6: Kelebek, sirkesineği ve kuantum kızılgerdan

1 F. A. Urquhart, "Found at last: the monarch's winter home", *National Geographic*, Ağustos 1976.
2 R. Stanewsky, M. Kaneko, P. Emery, B. Beretta, K. Wager-Smith, S. A. Kay, M. Rosbash ve J. C. Hall, "The cryb mutation identifies cryptochrome as a circadian photoreceptor in *Drosophila*", *Cell*, cilt 95: 5 (1998), s. 681-92.
3 H. Zhu, I. Sauman, Q. Yuan, A. Casselman, M. Emery-Le, P. Emery ve S. M. Reppert, "Cryptochromes define a novel circadian clock mechanism in monarch butterflies that may underlie sun compass navigation", *PLOS Biology*, cilt 6: 1 (2008), e4.
4 D. M. Reppert, R. J. Gegear ve C. Merlin, "Navigational mechanisms of migrating monarch butterflies", *Trends in Neurosciences*, cilt 33: 9 (2010), s. 399-406.
5 P. A. Guerra, R. J. Gegear ve S. M. Reppert, "A magnetic compass aids monarch butterfly migration", *Nature Communications*, cilt 5: 4164 (2014), s. 1-8.
6 A. T. von Middendorf, *Die Isepiptesen Russlands Grundlagen zur Erforschung der Zugzeiten und Zugrichtungen der Vögel Russlands* (St. Petersburg, 1853).
7 H. L. Yeagley ve F. C. Whitmore, "A preliminary study of a physical basis of bird navigation", *Journal of Applied Physics*, cilt 18: 1035 (1947).
8 M. M. Walker, C. E. Diebel, C. V. Haugh, P. M. Pankhurst, J. C. Montgomery ve C. R. Green, "Structure and function of the vertebrate magnetic sense", *Nature*, cilt 390: 6658 (1997), s. 371-6.
9 M. Hanzlik, C. Heunemann, E. Holtkamp-Rotzler, M. Winklhofer, N. Petersen ve G. Fleissner, "Superparamagnetic magnetite in the upper beak tissue of homing pigeons", *Biometals*, cilt 13: 4 (2000), s. 325-31.
10 C. V. Mora, M. Davison, J. M. Wild ve M. M. Walker, "Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon', *Nature*, cilt 432 (2004), s. 508-11.

11 C. Treiber, M. Salzer, J. Riegler, N. Edelman, C. Sugar, M. Breuss, P. Pichler, H. Cadiou, M. Saunders, M. Lythgoe, J. Shaw ve D. A. Keays, "Clusters of iron-rich cells in the upper beak of pigeons are macrophages not magnetosensitive neurons", *Nature*, cilt 484 (2012), s. 367-70.

12 S. T. Emlen, W. Wiltschko, N. J. Demong, R. Wiltschko ve S. Bergman, "Magnetic direction finding: evidence for its use in migratory indigo buntings", *Science*, cilt 193: 4252 (1976), s. 505-8.

13 L. Pollack, "That nest of wires we call the imagination: a history of some key scientists behind the bird compass sense", Mayıs 2012, s. 5: http://www.ks.uiuc.edu/History/magnetoreception.14

14 Age, s. 6

15 K. Schulten, H. Staerk, A. Weller, H-J. Werner ve B. Nickel, "Magnetic field dependence of the geminate recombination of radical ion pairs in polar solvents", *Zeitschrift für Physikale Chemie*, n.s., cilt 101 (1976), s. 371-90.

16 Pollack, "That nest of wires we call the imagination", s. 11.

17 K. Schulten, C. E. Swenberg ve A. Weller, "A biomagnetic sensory mechanism based on magnetic field modulated coherent electron spin motion", *Zeitschrift für Physikale Chemie*, n.s., cilt 111 (1978), s. 1-5.

18 P. Hore, "The quantum robin", *Navigation News*, Ekim 2011.

19 N. Lambert, "Quantum biology", *Nature Physics*, cilt 9: 10 (2013) ve oradaki referanslar.

20 M. J. M. Leask, "A physicochemical mechanism for magnetic field detection by migratory birds and homing pigeons", *Nature*, cilt 267 (1977), s. 144-5.

21 T. Ritz, S. Adem ve K. Schulten, "A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds", *Biophysical Journal*, cilt 78: 2 (2000), s. 707-18.

22 M. Liedvogel, K. Maeda, K. Henbest, E. Schleicher, T. Simon, C. R. Timmel, P. J. Hore ve H. Mouritsen, "Chemical magnetoreception: bird cryptochrome 1a is excited by blue light and forms long-lived radical pairs", *PLOS One*, cilt 2: 10 (2007), e1106.

23 C. Nießner, S. Denzau, K. Stapput, M. Ahmad, L. Peichl, W. Wiltschko ve R. Wiltschko, "Magnetoreception: activated cryptochrome 1a concurs with magnetic orientation in birds", *Journal of the Royal Society Interface*, cilt 10: 88 (6 Kasım 2013), 20130638.

24 T. Ritz, P. Thalau, J. B. Phillips, R. Wiltschko ve W. Wiltschko, "Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass", *Nature*, cilt 429 (2004), s. 177-80.

25 S. Engels, N-L. Schneider, N. Lefeldt, C. M. Hein, M. Zapka, A. Michalik, D. Elbers, A. Kittel, P. J. Hore ve H. Mouritsen, "Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird", *Nature*, cilt 509 (2014), s. 353-6.
26 E. M. Gauger, E. Rieper, J. J. Morton, S. C. Benjamin ve V. Vedral, "Sustained quantum coherence and entanglement in the avian compass", *Physical Review Letters*, cilt 106: 4 (2011), 040503.
27 M. Ahmad, P. Galland, T. Ritz, R. Wiltschko ve W. Wiltschko, "Magnetic intensity affects cryptochrome-dependent responses in *Arabidopsis thaliana*", *Planta*, cilt 225: 3 (2007), s. 615-24.
28 M. Vacha, T. Puzova ve M. Kvicalova, "Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach", *Journal of Experimental Biology*, cilt 212: 21 (2009), s. 3473-7.

Bölüm 7: Kuantum genler

1 Y. M. Shtarkman, Z. A. Kocer, R. Edgar, R. S. Veerapaneni, T. D'Elia, P. F. Morris ve S. O. Rogers, "Subglacial Lake Vostok (Antarctica) accretion ice contains a diverse set of sequences from aquatic, marine and sediment-inhabiting bacteria and eukarya", *PLOS One*, cilt 8: 7 (2013), e67221.
2 J. D. Watson ve F. H. C. Crick, "Molecular structure of nucleic acids: a structure for deoxyribose nucleic acid", *Nature*, cilt 171 (1953), s. 737-8.
3 C. Darwin, *Türlerin Kökeni*, bölüm 4.
4 J. D. Watson ve F. H. C. Crick, "Genetic implications of the structure of deoxyribonucleic acid", *Nature*, cilt 171 (1953), s. 964-9.
5 W. Wang, H. W. Hellinga ve L. S. Beese, "Structural evidence for the rare tautomer hypothesis of spontaneous mutagenesis", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 108: 43 (2011), s. 17644-8.
6 A. Datta ve S. Jinks-Robertson, "Association of increased spontaneous mutation rates with high levels of transcription in yeast", *Science*, cilt 268: 5217 (1995), s. 1616-19.
7 J. Bachl, C. Carlson, V. Gray-Schopfer, M. Dessing ve C. Olsson, "Increased transcription levels induce higher mutation rates in a hypermutating cell line", *Journal of Immunology*, cilt 166: 8 (2001), s. 5051-7.
8 P. Cui, F. Ding, Q. Lin, L. Zhang, A. Li, Z. Zhang, S. Hu ve J. Yu, "Distinct contributions of replication and transcription to mutation rate variation of human genomes", *Genomics, Proteomics and Bioinformatics*, cilt 10: 1 (2012), s. 4-10.

9 J. Cairns, J. Overbaugh ve S. Millar, "The origin of mutants", *Nature*, cilt 335 (1988), s. 142-5.

10 John Cairns ile Jim Watson üzerine, Cold Spring Harbor Sözlü Tarih Koleksiyonu.
Söyleşinin erişim adresi: http://library.cshl.edu/oralhistory/interview/james-d-watson/meeting-jim-watson/watson/.

11 J. Gribbin, *Schrödinger'in Kedisinin Peşinde*, çev. Nedim Çatlı, Metis Yayıncılık, 2005.

12 J. McFadden ve J. Al-Khalili, "A quantum mechanical model of adaptive mutation", *Biosystems*, cilt 50: 3 (1999), s. 203-11.

13 J. McFadden, *Quantum Evolution* (Lond: HarperCollins, 2000).

14 Eleştirel bir derleme yazısına şu adresten ulaşabilirsiniz: http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101019; yazıya yanıtımız için erişim adresi: http://arxiv.org/abs/quant-ph/0110083.

15 H. Hendrickson, E. S. Slechta, U. Bergthorsson, D. I. Andersson ve J. R. Roth, "Amplification-mutagenesis: evidence that 'directed' adaptive mutation and general hypermutability result from growth with a selected gene amplification", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 99: 4 (2002), s. 2164-9.

16 Örneğin; J. D. Stumpf, A. R. Poteete ve P. L. Foster, "Amplification of *lac* cannot account for adaptive mutation to Lac+ in *Escherichia coli*", *Journal of Bacteriology*, cilt 189: 6 (2007), s. 2291-9.

17 Örneğin; E. S. Kryachko, "The origin of spontaneous point mutations in DNA via Lowdin mechanism of proton tunneling in DNA base pairs: cure with covalent base pairing", *International Journal Of Quantum Chemistry*, cilt 90: 2 (2002), s. 910-23; Zhen Min Zhao, Qi Ren Zhang, Chun Yuan Gao ve Yi Zhong Zhuo, "Motion of the hydrogen bond proton in cytosine and the transition between its normal and imino states", *Physics Letters A*, cilt 359: 1 (2006), s. 10-13.

18 A. D. Godbeer, J. S. Al-Khalili ve P. D. Stevenson, "Modelling Proton Tunnelling in the Adenine-Thymine Base Pair" - *Physical Chemistry, Chemical Physics* (2015) dergisinde yayımlanmak üzere kabul edildi.

Bölüm 8: Zihin

1 Röportaj, *Los Angeles Times*, 14 Şubat 1995.

2 J-M. Chauvet, E. Brunel-Deschamps, C. Hillaire ve J. Clottes, *Dawn of Art. The Chauvet Cave: The Oldest Known Paintings in the World* (New York: Harry N. Abrams, 1996).

3 J. Hadamard, *Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field* (Princeton: Princeton University Press, 1945). Ancak, "Memes and the exploitation of imagination" başlıklı makalesinde

de belirttiği üzere Daniel Dennett'a göre, sıkça alıntı yapılan bu ifade muhtemelen Mozart'a ait olmayıp kökeni belirsizdir; *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, cilt 48 (1990), s. 127-35 (erişim adresi http://ase.tufts.edu/cogstud/dennett/papers/memeimag.htm#5). Yine de ifadeye bu bölümde yer verdik çünkü yazar, her kim olursa olsun, aşina olduğumuz çarpıcı bir fenomeni çok güzel tarif etmiş.

4 J. McFadden, "The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning", *Journal of Consciousness Studies*, cilt 20: 3-4 (2013), s. 152-82.

5 Chauvet ve ark., *Dawn of Art*.

6 M. Kinsbourne, "Integrated cortical field model of consciousness", *Experimental and Theoretical Studies of Consciousness*, CIBA Vakfı Sempozyumu No. 174 (Chichester: Wiley, 2008).

7 K. Saeedi, S. Simmons, J. Z. Salvail, P. Dluhy, H. Riemann, N. V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, J. J. L. Morton ve M. L. W. Thewalt, "Room-temperature quantum bit storage exceeding 29 minutes using ionized donors in silicon-28", *Science*, cilt 342: 6160 (2013), s. 830-33.

8 D. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: Bir Ebedi gökçe Belik, çev. Hamide Koyukan, Ergün Akça; Kabalcı Yayınları, 2001; tekrar basım Pinhan Yayınları, 2011.*

9 R. Penrose, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

10 S. Hameroff, "Quantum computation in brain microtubules? The Penrose-Hameroff 'Orch OR' model of consciousness", *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, cilt 356: 1743 (1998), s. 1869-95; S. Hameroff ve R. Penrose, "Consciousness in the universe: a review of the 'Orch OR' theory", *Physics of Life Reviews*, cilt 11 (2014), s. 39-78.

11 M. Tegmark, "Importance of quantum decoherence in brain processes", *Physical Review E*, cilt 61 (2000), s. 4194-206.

12 Örneğin bkz. A. Litt, C. Eliasmith, F. W. Kroon, S. Weinstein ve P. Thagard, "Is the brain a quantum computer?", *Cognitive Science*, cilt 30: 3 (2006), s. 593-603.

13 G. Bernroider ve J. Summhammer, "Can quantum entanglement between ion transition states effect action potential initiation?", *Cognitive Computation*, cilt 4 (2012), s. 29-37.

14 McFadden, *Quantum Evolution*; J. McFadden, "Synchronous firing and its influence on the brain's electromagnetic field: evidence for an electromagnetic theory of consciousness", *Journal of Consciousness Studies*, cilt 9 (2002), s. 23-50; S. Pockett, *The Nature of Consciousness:*

A Hypothesis (Lincoln, NE: Writers Club Press, 2000); E. R. John, "A field theory of consciousness", *Consciousness and Cognition*, cilt 10:2 (2001), s. 184-213; J. McFadden, "The CEMI field theory closing the loop", *Journal of Consciousness Studies*, cilt 20: 1-2 (2013), s. 153-68.

15 McFadden, "The CEMI field theory gestalt information and the meaning of meaning".

16 C. A. Anastassiou, R. Perin, H. Markram ve C. Koch, "Ephaptic coupling of cortical neurons", *Nature Neuroscience*, cilt 14: 2 (2011), s. 217-23; F. Frohlich ve D. A. McCormick, "Endogenous electric fields may guide neocortical network activity", *Neuron*, cilt 67: 1 (2010), s. 129-43.

17 McFadden, "The CEMI field theory closing the loop".

18 W. Singer, "Consciousness and the structure of neuronal representations", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, cilt 353: 1377 (1998), s. 1829-40.

Bölüm 9: Yaşam nasıl başladı?

1 S. L. Miller, "A production of amino acids under possible primitive earth conditions", *Science*, cilt 117: 3046 (1953), s. 528-9.

2 G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story* (Cambridge: Cambridge University Press, 1985; yeni basım 1990).

3 McFadden, *Quantum Evolution*; J. McFadden ve J. Al-Khalili, "Quantum coherence and the search for the first replicator", D. Abbott, P. C. Davies ve A. K. Patki (Ed.), *Quantum Aspects of Life* (Londra: Imperial College Press, 2008).

4 A. Patel, "Quantum algorithms and the genetic code", *Pramana Journal of Physics*, cilt 56 (2001), s. 367-81; erişim adresi http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0002037.pdf.

Bölüm 10: Kuantum biyolojisi: fırtınanın sınırında yaşam

1 M. B. Plenio ve S. F. Huelga, "Dephasing-assisted transport: quantum networks and biomolecules", *New Journal of Physics*, cilt 10 (2008), 113019; F. Caruso, A. W. Chin, A. Datta, S. F. Huelga ve M. B. Plenio, "Highly efficient energy excitation transfer in light-harvesting complexes: the fundamental role of noise-assisted transport", *Journal of Chemical Physics*, cilt 131 (2009), 105106-21.

2 M. Mohseni, P. Rebentrost, S. Lloyd ve A. Aspuru-Guzik, "Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer", *Journal of Chemical Physics*, cilt 129: 17 (2008), 174106.

3 B. Misra ve G. Sudarshan, "The Zeno paradox in quantum theory", *Journal of Mathematical Physics*, cilt 18 (1977), s. 746: http://dx.doi.org/10.1063/1.523304.

4 S. Lloyd, M. Mohseni, A. Shabani ve H. Rabitz, "The quantum Goldilocks effect: on the convergence of timescales in quantum transport", arXiv preprint, arXiv:1111.4982, 2011.

5 A. W. Chin, S. F. Huelga ve M. B. Plenio, "Coherence and decoherence in biological systems: principles of noise-assisted transport and the origin of long-lived coherences", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, cilt 370 (2012), s. 3658-71; A. W. Chin, J. Prior, R. Rosenbach, F. Caycedo-Soler, S. F. Huelga ve M. B. Plenio, "The role of non-equilibrium vibrational structures in electronic coherence and recoherence in pigment-protein complexes", *Nature Physics*, cilt 9: 2 (2013), s. 113-18.

6 E. J. O'Reilly ve A. Olaya-Castro, "Non-classicality of molecular vibrations activating electronic dynamics at room temperature", *Nature Communications*, cilt 5 (2014), makale no. 3012.

7 I. Stewart, *Does God Play Dice?: The New Mathematics of Chaos* (Harmondsworth: Penguin UK, 1997); S. Kauffman. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution* (New York: Oxford University Press, 1993); J. Gleick, *Chaos: Making a New Science* (New York: Random House, 1997).

8 M. O. Scully, K. R. Chapin, K. E. Dorfman, M. B. Kim ve A. Svidzinsky, "Quantum heat engine power can be increased by noise-induced coherence", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 108: 37 (2011), s. 15097-100.

9 K. E. Dorfman, D. V. Voronine, S. Mukamel ve M. O. Scully, "Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 110: 8 (2013), s. 2746-51.

10 N. Killoran, S. F. Huelga, M. B. Plenio, "Enhancing light-harvesting power with coherent vibrational interactions: a quantum heat engine picture", arXiv preprint, arxiv.org/abs/1412.4136, 2014.

11 M. Ferretti, V. I. Novoderezhkin, E. Romero, R. Augulis, A. Pandit, D. Zigmantas ve R. Van Grondelle, "The nature of coherences in the B820 bacteriochlorophyll dimer revealed by two-dimensional electronic spectroscopy", *Physical Chemistry Chemical Physics*, cilt 16 (2014), s. 9930-9.

12 C. R. Pudney, A. Guerriero, N. J. Baxter, L. O. Johannissen, J. P. Waltho, S. Hay ve N. S. Scrutton, "Fast protein motions are coupled to enzyme H-transfer reactions", *Journal of the American Chemical Society*, cilt 135 (2013), s. 2512-17.

13 J. P. Klinman ve A. Kohen, "Hydrogen tunnelling links protein dynamics to enzyme catalysis", *Annual Review of Biochemistry*, cilt 82 (2013), s. 471-96.
14 R. Armstrong ve N. Spiller, "Living quarters", *Nature*, cilt 467 (2010), s. 916-19.
15 S. Leduc, *The Mechanism of Life* (Londra: William Heinemann, 1914).
16 T. Toyota, N. Maru, M. M. Hanczyc, T. Ikegami ve T. Sugawara, "Self-propelled oil droplets consuming 'fuel' surfactant", *Journal of the American Chemical Society*, cilt 131: 14 (2009), s. 5012-13.
17 I. A. Chen, K. Salehi-Ashtiani ve J. W. Szostak, "RNA catalysis in model protocell vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, cilt 127: 38 (2005), s. 13213- 19.
18 R. J. Peters, M. Marguet, S. Marais, M. W. Fraaije, J. C. van Hest ve S. Lecommandoux, "Cascade reactions in multicompartmentalized polymersomes", *Angewandte Chemie International Edition* (English), cilt 53: 1 (2014), s. 146-50.
19 D. Hayes, G. B. Griffin ve G. S. Engel, "Engineering coherence among excited states in synthetic heterodimer systems", *Science*, cilt 340: 6139 (2013), s. 1431-4.
20 Dorfman ve ark., "Photosynthetic reaction center as a quantum heat engine".
21 C. Creatore, M. A. Parker, S. Emmott ve A. W. Chin, "An efficient biologically-inspired photocell enhanced by quantum coherence", arXiv preprint, arXiv:1307.5093, 2013.
22 C. Tan, S. Saurabh, M. P. Bruchez, R. Schwartz ve P. Leduc, "Molecular crowding shapes gene expression in synthetic cellular nanosystems", *Nature Nanotechnology*, cilt 8: 8 (2013), s. 602-8; M. S. Cheung, D. Klimov ve D. Thirumalai, "Molecular crowding enhances native state stability and refolding rates of globular proteins", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, cilt 102: 13 (2005), s. 4753-8.

Dizin

İtalik sayfa numaraları *çizimleri* göstermektedir.

ADH enzimi, 99, 101
akresyon buzu, 212
aksiyon potansiyeli, 259, *260*, 281
akson, *152*, 153-4, 253-4, *260*, 261, *262*
alabalık, 185
alan, terim, 278
Al-Khalili, Jim, *19*, 238, 242, 244
amino asitler, 68, 84, 291, 313
amniyot, 250
amplifikasyon kuramı, 54, 61, 85-6, 141
anemon balığı (palyaço balığı), 142-6, 147-8, 176, 183
Antarktika, 209-15, 221
asetofenon, 170–3
Aristoteles, 29, 30, 38
Armstrong, Rachel, 335
aromalar, 149
Arvedlund, Michael, 146
asetofenon, 170–3
Aspect, Alain, 16, 17, 18, 22, 119
Atkins, Peter, 5
atomlar: Bohr'un çalışması, 46; çekirdekler, 10, 11–13, 46, 95, 100; çift yarık deneyi, 112-23; davranışı, 7, 20, 28, 310; dolanıklık, 206-8; gezegen modeli, 46, 97; Heisenberg'in çalışması, 48; hidrojen, 11, 13, 22, 97-8, 100; kimyasal bağlar, 75, 77-9; kübitler, 268–70; magnezyum, *130*; oksitlenme, 322; rastgeleleştirici faktörler, 22; Schrödinger'in çalışması, 49; serbest radikaller, 201; uyum ve uyumsuzluk, 123–6;
ATP, 90, 137-8, 342
Axel, Richard, 154-7, 166
Avery, Oswald, 40
Avrupa, 212
ayılar, 148

Bachelard, Gaston, 142
bağlanma problemi, 253, 255, 278, 279
bakteri, 187, 228, 235–42, 284
Bateson, William, 226n
Belirsizlik İlkesi, Heisenberg'in, 17n, 48–9, 54
Bernroider, Gustav, 277
Bertalanffy, Ludwig von, 52
Beyer, Peter, 334
beyin, insan: bilinç, 27, 253, 256, 264, 273; duyusal verilere yanıt,

253–6; elektromanyetik (EM) alan, 278–81; iyon kanalları, 276–8; koku soğanı, 153, 154; kuantum bilgisayar olarak, 265, 271, 272–6; nöral ağ, 263; sinir sinyalleri, *259*; sirkadiyen duyu, 180
bilgisayarlar, 263, 264, 265–6, 268; virüsler, 300
bilinç: açıklamalar, 264–5; bağlanma problemi, 253, 256, 277, 279; düşünce mekanikleri, 258–654; EM alan teorileri, 280–1; görüşler, 253–4, 256, 281; işlev, 263–4; iyon kanalları, 277–8, 281; "kendilik" hissi, 253–4; kuantum mekanik fenomeni, 265, 272–3, 276, 281; nedir?, 250–1; ortaya çıkışı, 250–1; Penrose-Hameroff kuramı, 273–5; zor problem, 256
bira mayası, 67, 68, 72, 98, 234
biyoloji, sentetik, 333-4
biyomoleküller: enzimatik işlem, 79, 102, 104, 128; hayatta kalma, 65; ilkel, 305; metabolizma, 66, 289; ölçüm, 23; yapı, 20, 311
Biosystems, 238
Bohr, Niels, 46, 48, 53
Boltzmann, Ludwig, 33, 39, 56
Born, Max, 53
Bowyer, Adrian, 299
Boyle, Robert, 55
Brookes, Jennifer, *19*, 173–4
Brugger, Kenneth C., 178
Brunel-Deschamps, Carole, 248
Brunel-Deschamps, Eliette, 246
Buchner, Eduard, 71, 74
Buck, Linda, 155-7, 166
buhar motorları, 33–4, 319–20
Burr, Chandler, 170
Büyük Set Resifi, 144–5

Cairns, John, 235-6, 237-8, 240-1
Cairns-Smith, Graham, 297
Calhoun, Tessa, 137
Carnot döngüsü, 320
Carnot limiti, 321, 323, 341
Carnot, Sadi, 319-20, 324
Casteret, Norbert, 246
Cave of Forgotten Dreams (film), 249
Cech, Thomas, 295
Chance, Britton, 91-2, 93, 96, 101
Charles, Jacques, 55
Chauvet, Jean-Marie, 246–8, 249, 281
Chauvet mağarası, 247-9, 253, 256, 257
Clapton, Eric, 163, 174
Clemens, Wilbert A., 146
Condon, Edward, 93
Crick, Francis, 41, 216, 228

çamur volkanları, 285–6, *286*
çift yarık deneyi, 109–23, *111*, *114*, *115*, 315, 323
çift yarık deneyi, *bkz.* çift yarık deneyi düalizmi, 264
Çin düşüncesi, 29

D-Wave, 270
dalga fonksiyonu, 49–51, 53n, 119–22, 126
dalga mekaniği, 49
dalga özellikleri, 8–11, 47, 94–7, 101, 109
dalga–parçacık ikiliği, 8–9, 10, 109, 119
Darwin, Charles: Darwin, Erasmus, 222; doğal seçilim, 223–4, 226, 288; evrim teorisi, 4, 7, 222, 226; Lamarck'ın çalışması, 223–4, 225; Mendel'in çalışması, 39, 226; yaşamın kökeni üzerine, 282, 287, 302
Datta, Abhijit, 234

Davies, Paul, *19*
Davis, Kaptan John, 210
dekaboran, 169, 170
Delbruck, Max, 227, 228, 235
Descartes, René, 32, 67, 263–4, 329
DeVault, Don, 91–2, 93, 96, 101
de Vries, Hugo, 226
döteron, 12–13
döteryum, 11–12, 100, 170–3, 176, 241–2, 289
dil, 253, 271–2
din, 29, 149
dinozorlar: Antarktika, 209; ataları, 50; fosil, 62–7, 71; kollajen ve kollajenaz, 63, 64–5, 66, 72–3, 80, 303, 331; kuantum pusulalar, 208; soyun tükenmesi, 209
dipenten, 162, *163*, 170, 173, 174
dirimselcilik, 37–8, 52, 107, 329
Dixson, Daniella, 146
DNA: bazlar, 219–20, 229–32, 241, 306; Cairns'in *E. coli* deneyi, 228–42; çift sarmal, 41, 59, 216, 294; dizileme teknolojisi, 213; genetik bilgi, 41–2, 214, 293–6; genetik mühendisliği, 154; kimyasal bağ (ortaklaşılan), *217*, 219, 229–30; kopyalama hataları (mutasyonlar), 215–6, 220–1, 232–4; kuantum mekaniği, 20–1, 233; kuantum tünelleme, 232–3, 238, 243–5, 306; kromozom, 40, 61, 235, 295; manyetik algılama, 4; mitokondriyal, 87; okuma işlemi, 234, 239; ortaya çıkışı, 295–6; replikasyon, 216, 220, 233–4, 235, 294; sentezlenmiş, 43; totomerler, 229–33, *230*, *231*, 238–9, 243–5; transkripsiyon, 234, 236; translasyon, 234; Vostok çalışması, 213–4; yapısı, 216–20, *217*, 227, 228–9; yapısının keşfi, 41, 59
DNA polimeraz, 218, 231, 233, 294
doğal seçilim, 7, 83, 223–4, 235, 288, 296, 316
doğan, 67
dolanıklık: "anında uzaktan etki", 196; Aspect'in deneyi, 16, 17–18, 120; hızlı üçlü tepkimesi, 15, 19, 23, 190, 192, 201; iyon kanalları, 277; kanatlı pusulası, 19, 20, 23, 192, 202, 204–8, 345; kanıtlanmış, 198; koku reseptörü ilkesi, 343; kuantum durumu, 14–15, 198–200; kübitler, *266*, 267–9, *269*, 271, 303; ölçüm, 16–17, 23, 198–9; Penrose–Hameroff bilinç kuramı, 274; radikal çiftler, 201–2, 204, 196–7; "uzak mesafeden hayaletimsi etki", 16–17, 197, 208
düşünce mekanikleri, 258–64
"düzenden doğan düzen", 58, 61, 85, 141, 220
"düzensizlikten doğan düzen", 56, 57–8, 60, 218, 309, *310*, 318–9, 326, 327
Dyson, Malcolm, 159–62, 166

E. coli, 237–41, 305
Einstein, Albert: dolanıklık üzerine, 16, 18–9, 194, 197–8, 208; $E=mc^2$, 279; görelilik teorisi, 197; çalışmaları, 45, 322
eksiklik teoremleri, 271–2
eksiton: ikili sistem, 130–1, *130*; kuantum ön-hücre, 341–2; kuantum uyumu, 133, 313–7, 341; tepkime merkezine taşınması, 131–2, 133–7, *135*, 271, 313–8, 322, 325
ekstremofiller, 212
elektron mikroskobu, 9, 21, 22
elektronlar: dalga fonksiyonu, 50–1; dalga mekaniği, 49; dolanık çiftler,

14–15, 191, 193, 198–200, 201, 204, 205; eksitonlar, 130–1, *135*, 137; enzim etkinliği, 76–8, *83*, 85, 87–93, 232, 302, 305; fotoelektrik etki, 45; fotosentez, 137–8; Heisenberg'in Belirsizlik İlkesi, 48–9; ilkel kuantum ön-hücre, 342; kuantize yörüngeler, 46; kuantum ısı motoru, 320–3; kuantum spin, 194–5, 198–200, 201; kuantum tünelleme, 94–5, *95*, 96–7, 98, 101–2, 167–8, 174–5, 232, 302, 305, 346; kübitler, 270; radikal çift oluşumu, 202; oksidasyon, 88, 137, 322; ölçüm, 124; ön-enzim, 303, 304
Emlen huni kafesi, 190, *191*
Emlen, John, 190
Emlen, Stephen, 190, 191
enerji: bariyerleri, 10–11, 76, 94, 97–8, 101, 109, 232, 302; dalga teorisi, 8, 31, 45; endüstri, 332; frekans ve, 46–8; güneş ışığı, 9–10, 11, 94, 133, 137, 289; ışık, 161; kavramı, 31; kinetik, 31; kuanta, 4; kuantum ön-hücre, 340–2; kuantum tünelleme, 96; profili, 75–8, *75*, *76*, 84, 94–5, *95*; serbest, 36; solunum, 89–90, 105, 126–7; termodinamik, 36; transportu, 131–7, 140, 249, 277, 312, 315, 340
Engel, Greg, *19*, 133, 136, 140, 340
entropi, 35
enzimler: ADH, 98, 101; aktif bölgeler, 82–8, *83*, 103–4, 159; DNA polimeraz, 218, 231, 233, 294; elektron transferi, 88, 89–93, 97, 132; fotosentez, 127–8, 137–8; geçiş durumu kuramı, 74, 78–9, 86–7; hakkındaki inanışlar, 67–8, 70–1; kataliz, 71, 78–9, 85; kinetik izotop etki, 100–1, 242, 289; kollajenaz, 69–70, 73, 76, 79, 82–85, *83*, 87, 88, 97, 104–5; kuantum hipotezi, 59, 66, 84–5, 87–8, 93; kuantum tünelleme, 93, 94, 96–7, 98, 101–2, 141, 167, 170, 232, 241; kullanılması, 66–7, 71–2, 331; miyozin, 258; ön-enzim, 303–4; ön-hücreler, 338, 342–3; Pasteur'ün çalışmaları, 39, 67; proton transferi, 88, 89; proton tünelleme, 98–9, 101, 240, 241, 325; reaktanları ürünlere dönüştürmek, *76*; replikasyon, 288, 295, 339; ribozimler, 295, 298, 336; RNA polimeraz, 218; solunumla ilgili, 90–1, 137, 347; titreşimler, 101–2, 325; yapısı, 21; yaşamın motorları, 65–6, 67–8, 73, 103, 105, 220, 325
esnek olmayan elektron tünelleme, 175
esnek olmayan elektron tünelleme spektroskopisi (IETS), 167–8
eşek otu, 226
eşzamanlı hale getirme, vücut saati, 181–2
ev güvercinleri, 185, 186–8, 202–3
evrim, 7, 221, 235, 236

FAD molekülü, 181, 203
Fenna–Matthews–Olson (FMO) proteini, 133, 134–4, *135*, 136, 140, 341
fermantasyon, 38, 68
Feynman, Richard: ağaçlar üzerine, 106; atomlar üzerine, 62; çift yarık deneyi üzerine, 109; eksiton enerjisi üzerine, 137; fotosentez üzerine, 108, 137; kuantum hesaplama üzerine, 265–6; MIT'de, 106–7; nanoteknoloji üzerine, 79; "yaratamıyorsam

anlamıyorumdur", 44, 87, 331, 344
fikirler, 253–4, 256, 281
Fleming, Graham, 132–3, 134, 314
fosiller, 63–7, 70, 286
fosgen, 159
Foster, Norman, 335
Frankenstein, 44
Franklin, Rosalind, 41
frekans, 45–7
Freud, Sigmund, 151
Fromme, Hans, 187
fotonlar, 16, 17, 44, 45
fotosel, 321, 341
fotosentez: enerji transportu, 131–37, 277, 306, 312, 315, 322, 325, 340–1; Feynman'ın tanımı, 108, 137; ışığın saptanması, 181; kuantum hesaplama, 265; kuantum uyumluluk, 133–6, 240, 312–4, 315–6, 317, 341, 343; merkezine seyahat, 126–32; solunumla karşılaştırma, 138–9; sıcaklıklar, 136, 317; tepkime merkezi, 322, 325

Galen, 150
Galileo, 31
Gamow, George, 93
gaz kanunları, 55
geçiş durumu kuramı (GDK), 74–5, 77–8, 86–7
gelişigüzellik, 22–3
gelişigüzel yürüyüş, 131–2, 135, 306
genetik, 226–7; kuantum mekaniğiyle bağlantısı, 233, 244–5, 306
genetik bilgi kopyalamada sadakatsizlik, 221–2, 245
genetik şifre, 216, 219–20, 306
genetik mühendisliği, 333
genler, 39–41; Cairns'in çalışmaları, 235–40; DNA, 39–40, 294; kalıtım, 55, 58; koku reseptörleri, 148–9, 155–6; kopyalama, 215, 218, 220–1; kriptokrom, 181; Mendel'in çalışmaları, 39, 225–6; mutasyonlar, 227, 234, 235–7, 240–1; okuma işlemi, 233–4, 295; teknolojilerin gelişimi, 59, 333; RNA, 293–5; Schrödinger'in çalışmaları, 55, 58, 214, 218–9, 220, 244; Vostok dizileri, 213–4, 215
genom: Cairns'in çalışmaları, 237, 241; DNA dizileme teknolojisi, 213; koku reseptörleri, 156; RNA, 294; kopyalama, 215–6, 221, 233, 245; Venter'in çalışması, 43, 284, 334, 343
gerçeklik, üç katmanı, 308–9, *310*
Gerlach, Gabriele, 145, 171, 183
Gilbert, Jim, 179
girişim desenleri: çift yarık deneyi, 110–13, *115*, 117–8, 133, 323; sıcaklık, 125; suya atılan çakıl taşları, 110, 124
Godbeer, Adam, 244
Goldilock bölgesi, 314, 318
göç: kuşlar, 3, 184; Avrupa kızılgerdanları, 1–6; kral kelebekleri, 3, 177–80; somonbalığı, 3, 146, 147–8
Gödel, Kurt, 271–2, 276
Gödel önermeleri, 272, 275
görelilik kuramı, 10n, 16, 140n, 197
Gribbin, John, 237
Gross, Jerome, 73
Grönland, 282–7, *285*, 293
Gurney, Ronald, 93
güneş, 9–11, 20, 22, 93
gürültü: renkli, 313, 316; beyaz, 313, 316, 323
güveler, 151

Haldane, J. B. S., 288
hamamböcekleri, 208
Hameroff, Stuart, 273–4
Hanczyc, Martin, 337–8
Hansen, Christian, 72
hardal gazı, 159
hareket, 30–1, 308
Harmon, Bob, 64
Harvey, William, 33, 39
Hasler, Arthur, 146
Heisenberg, Werner, 48, 49, 51, 53, 315
Hendrix, Jimi, 163, 174
Herschbach, Dudley, 202
Herzog, Werner, 249
hesaplamalı zihin kuramı, 263
hızlı üçlü tepkimesi, 15, 19, 23, 190, 192, 203
hidrojen atomları: enzim tepkimeleri, 97–8; kinetik izotop etki, 100; MRG tarayıcılar, 13, 22; yerine döteryum konması, 170, 171–3
hidroliz, 78–9
"hilkat garibeleri", 224
Hillaire, Christian, 246
Hofstadter, Douglas, 272
Hooke, Robert, 37
Hopfield, John, 96
Hore, Peter, 200
Horner, Jack, 64
Hoyle, Fred, 293
Huelga, Susana, 314
Hund, Friedrich, 93
Huxley, Thomas, 191
hücre iskeleti, 128
hücre dışı matriks, 69–70, 74, 79, 82
hücreler, 37-8, 41

Işık Toplayıcı Kompleks II (LHC II), 136

İbn-i Heysem, 31
İbn-i Sina, 31
ilkel kuantum ön-hücre, 340–4
ilkel replikatör, 288, 291
internet, 264, 301
Inuit, 283
iribaşlar, 70, 72, 80–86, 104–5
istatistiksel yasalar, 55–8, 61, 141
Isua kayaçları, 284–7, *285*, 293, 302, 337
itici kuvvet, 32–3, 319–25
iyon kanalları: kas kasılması, 259, 261–3; kuantum, 276–81, 346; voltaj kapılı, 261, *262*, 278, 279
izotoplar, 100, 284–7

Jinks-Robertson, Sue, 234
Johannsen, Wilhelm, 226n
Jordan, Pascual, 52–3, 61, 85, 310, 326

kalıtım: DNA şifresi, 39; gizemi, 52, 55, 214; kromozomlar, 38; kuantum mekaniğinin rolü, 216, 233, 244; ön-hücreler, 338; sadakat derecesi, 55, 218, 222, 223; Schrödinger'in çalışmaları, 55, 57–8, 214, 219–20, 221, 244
kanser, 216, 233
kan tazıları, 147
"kaostan doğan düzen", 319
Kapitsa, Andrey Petrovich, 211
kaplumbağalar, 3, 186
karbon, 137, 138
karıncalar, 27
karmaşıklık kuramı, 319
kas kasılması, 257–8, *259*, 281, 345
kataliz, 72, 74-9, 85, 86, 105
kayaçlar: Isua, 284–7, 302, 337; serpantin, 287; tarihleme, 284–5
Keller, Andreas, 171, 173
kendi kendini kopyalama, 214, 296, 298–302, 337–8

kendi kendini kopyalayıcılar, 293–5, 298–301, 302–6
kendi kendini örgütleme, 318
kendine yetebilirlik, 36–7, 330, 335, 339
kızılgerdanlar, Avrupa: ataları, 208; göç, 1–3, 345–6; ışığın manyetik algılamada rolü, 19, 182, 189, 203, 204–5; kuantum dolanıklığı kullanma, 18, 20, 23; kuantum etkiler, 345–6; manyetik duyu, 4, 5–6, 15, 20, 26, 27, 182; salınım yapan manyetik alanlara duyarlılık, 206–7; yön bulma, 3–4, 27; Wiltschko'ların deneyleri, 187–9, 192, 206
kinetik izotop etkisi, 99–102, 241, 289
Kinsbourne, Marcel, 264
klasik fizik: kuantum teorisi ve, 10, 16–17, 24, 28, 46-7; kurulması, 31; ölçüm, 22; tanımı, 10n; radyasyon kuramı, 45; Schrödinger, 55, 56, 57–8, 61, 107-8
Klinman, Judith, 98, 99, 101, 325
klorofil molekülü, *129*, 137, 323–4
kloroplast, 38, 128–9, 138, 312, 321
Knoll, Max, 9
koku alma: biçim kuramı, 158–9, 164–5, 166, 170, 174–5; kokunun anatomisi, *152*; odotop kuramı, 163–4; titreşim kuramı, 160, 164, 166–7, 170, 173–6
koku duyusu: anemon balığı, 146–8, 176; arılar, 141; ayılar, 148; balıklar, 145; burunların mücadelesi, 170–3; fizikçiler bir nefes çekiyor, 173–6; insan, 147, 148–51, 173, 175–6; gökkuşağı alabalığı, 185; güveler, 151; kanal testi, 145–6; koku anatomisi, *152*; koku kilidini açmak, 157–65; kokuların fiziksel gerçekliği, 151–7; köpekler, 147–8; kuantum burunla koklamak, 165–9; parfüm tanımlaması, 166, 254; sirkesineği, 171–2, 175–6; somonbalığı, 146; tarla faresi, 149; titreşim kuramı, 165–9, 170, 173–6; yön bulma, 146; yılan, 149
koku epiteli, 147, 254
koku molekülü bağlayan cep, 159, 174, 175
koku molekülleri: saptama, 157; reseptörlerle ilişki, 158–9, 163–4, 175; yakalanması, 27, 151, 154, 156, 254–5, 346
koku nöronları, 151–4, 157–8, 253, 255
koku reseptörleri: bağlanma cepleri, 159, 174, 175; biçim kuramı, 158–9, 164;Brookes ve Stoneham'ın çalışması, 174; genetik şifreleme, 148–9, 155–1, 214; insanda, 149, 156; koku molekülleriyle ilişkisi, 158, 163–4, 174; koku moleküllerinin yakalanması, 27, 254, 346; kokuların tanınması, 156–7, 158, 164; kokunun anatomisi, *152*, 153; kuantum dolanıklık, 343; odotop kuramı, 164; Turin'in çalışması, 167, 168, 253; titreşim kuramı, 163–5, 167; yapısı, 175
koku soğanı, 152, 153, 254
kollajen: biyomolekül, 63; dinozor fosili, 64–5, 303; kollajenaz etkisi, 83, *83*, 102; iribaş kuyruğu, 70, 72–3, 82, 104; rolü, 68-9; yapısı, 68, 76, *77*
kollajenaz: çalışma şekli, 70, 72, 83-4, *83*, 88, 97; çeneler, 83, 87, 101, 104; enzim, 65, 66; iribaş kuyruğu, 82, 104; rolü, 66, 69, 73–4, 79–80;

yapısı, 81, 87
Kopernik, 4
koyun, 224
köpekler, 147–8
kral kelebekleri, 177–82, 183
kriptofitler, 136
kriptokrom, 19–20, 181–4, 203–5, 208
kristaller, 218–9; aperiyodik, 218–9
kromoforlar, 129
kromozomlar, 39, 43, 61, 295
kuantum arama rutini, 302
kuantum bilgisayar(lar): olarak insan zihni, 265; olarak bitkiler, 108–9, 126, 265; yapımı, 108, 268–70, 313–4
kuantum biyolojisi, 14–19, 20–3, 52–5, 331–4
kuantum devrimi, 44–9
kuantum dolanıklık, *bkz.* dolanıklık
kuantum ısı motoru, 320–4
kuantum kavramı, 45
kuantum kuramı, 4, 45–7
kuantum mekaniği: Belirsizlik İlkesi, 48–9; bilinç ve, 251, 257, 265; bilinçteki rolü, 251, 253, 256, 257, 276–7, 278, 281; biyolojiyle ilgisi, 21, 24, 52–5, 59–60, 234, 240; dalga-parçacık ikiliği, 8–9; enzim etkisindeki rolü, 66, 84–8; frekans ve enerji, 46–8; yerçekimi, 140n; gelişimi, 7–8, 51–2, 58; genetikle bağlantısı, 233, 244–5; hayvanlarda göç, 182; kalıtım, 214, 216, 222; koku duyusu, 141, 159; kuantum dolanıklık, 198; kuantum ön-hücre, 340, 342; kuantum spin, 194; kuantum tünelleme, 10–11; merkezindeki gizem, 109–23; moleküler biyoloji, 108; MRG tarayıcılar, 13–14; ölçüm etkisi, 16–17, 23–4, 123, 234; özellikleri, 8–14, 16, 315; sentetik yaşam, 339–50; süperpozisyon, 11–13; tuhaflık ve normallik, 21–3, 308–9; yaşamın kökeni, 287, 301, 306
kuantum tasarımlı ışık tuzakları, 324
kuantum spin, *bkz.* Spin
kuantum süperpozisyon, *bkz.* Süperpozisyon
kuantum transport, 277, 314–8
kuantum tünelleme, *bkz.* tünelleme
kuantum uyumu: beyindeki mikrotübüller, 275; bitkiler ve mikroplar, 140, 141; canlı hücreler, 311, 314; devamlılığı, 104; enerji transportu, 340, 341; enzimler, 101; FMO kompleksi, 135, 136, 341; fotosentez, 133–6, 240, 212–3, 315–6, 317, 341, 343; imza, 134, 312; iyonlar, 277; kırılganlık, 126; korunması, 126, 133–6, 268, 271, 311, *328*, 342–3; kuantum hesaplama, 268–9, 271; kuantum ısı motoru, 323, 324; kuantum tünelleme, 94–5; MRG taraması, 21–2; ölçüm, 123; solar hücreler, 140; terim, 125–6; yaşamın kökeni, 306
kuantum vuru: Berkeley deneyi, 132–3, 314, 316; bitki fotosistemi tepkime merkezi II'de saptanması, 324; enerji transportunda, 133–6, 140, 312; FMO kompleksinde, 133–5, 136, 140; kuantum uyumunu korumak, 133–4, *134*; LHC2'de, 137; oluşumu, 133, 316; yakalama, 340–1
kuantum yasaları, 140, 218, 220, 309–10
kuantum yürüyüş, 302, 306
kuantum Zenon etkileri, 314–5, 317
Kuhne, Wilhelm Friedrich, 68
kurbağalar, 70, 71, 79–81, 84, 85,

104–5
kuşların göçü, 1–5, 184
kübitler, *266*, 266–70, *269*
kütleçekimi, 10, 31, 140n, 181, 273

Lamarck, Chevalier de, 222–3, 226, 227, 236
Lavoisier, Antoine, 33
lazer, 93, 133, 202, 322
Leask, Mike, 202
Leduc, Stéphane, 336
Lecommandoux, Sebastien, 338, 339, 340
Leeuwenhoek, Anton van, 37
ley hatları, 5
LHC2, 137
limonen, 153–4, 162, *163*, 170, 173, 174
Lloyd, Seth, 108, 134–5, 314
Longuet-Higgins, Christopher, 59
Lowdin, Per-Olov, 220, 232, 237, 238, 241
Luria, Salvador, 227, 228, 235

MacDougall, Duncan, 30
manyetik alan, dünya, *6*, 183–4, *189*; balıklarda yön bulma, 185–6; kanatlı pusulasının kuantum mekanizması, 20, 182, 201–2, 204; kimyasal tepkimeler üzerindeki etkileri, 5, 200, 201–3, 207; kuşlarda yön bulma, 3–6, 27, 184–5, 187–90, 202; saptamada kriptokromun rolü, 183, 203–4; saptanabilirlik, *bkz.* manyetik algılama
manyetik alan, salınım yapan, 213–4
manyetik algılama: bitkiler, 187; gizem, 4; hayvanlarda göç, 182, 208; kızılgerdanlar, 3–4, 26, 27; kuşlarda yön bulma, 3–4; kimyasal pusula, 187, 203–4; kriptokromun rolü, 19, 183–4, 203, 204–5, 208; konum belirleyici duyu organı, 187, 202–3, 275; Schulten'in çalışması, 191, 193; Wiltschko'ların çalışması, 202–3
manyetik algılayıcı, 185, 189
manyetik rezonans görüntüleme (MRG), 13–14, 21, 22, 60
manyetit, 186–8
manyetosfer, 184
Marcus, Rudolph, 91
Masel, Rich, 43
mavi kiraz kuşu, 190
Maxwell, James Clerk, 32n, 279
McCarthy, Cormac, 332
McFadden, Johnjoe, *19*, 237, 238, 240, 241
McGregor, Vic, 283–4
mekanosensitif sinirler, 255
Mendel, Gregor, 39, 225–6
Mercer, Ian, 136
merkaptanlar, 162
Merkel, Fritz, 187
metabolizma, 66, 289
Michel-Beyerle, Maria-Elisabeth, 192
Middendorf, Aleksandr von, 184
mikoplazma, 43, 292–3, 334
mikroskoplar: ilk, 37–8; elektron, 9, 21, 22
mikrotübüller, 273–4, 278
Miller, Stanley, 290–1, 302
Miller–Urey deneyi, 291
mimari, 335
mitokondri, 89–90
miyozin, 258
"model baz çiftleri", 241–2
moleküler biyoloji, 59, 108
moleküler gürültü (titreşimler), 311, 312–3, 315–6, 323
moleküller: biçim, 158–65, *160*, *163*; elektron transferi, 96; kararlı,

75–6; kimyasal bölümleri, *165*; kiral (ayna görüntüsü), *163*, 165–8, 170, 173, 174; klorofil, *129*, 137, 323–4; özel çift, 323; titreşimler, 45, 96, 160–2, 165–7, 174–5, 231, 243, 311–4, 316, 323–4; uyumsuzluk, 125
monizm, 264
Moorbath, Stephen, 284
Morgan, Thomas Hunt, 226
Mori, Kensaku, 164
motor sinirler, 258
Mouritsen, Henrik, 204, 207
Mozart, Wolfgang Amadeus, 253
mutasyon: adaptif 237, 238, 240–1; Cairns'in çalışması, 235–8, 240–1; eşek otu, 226; ilkel replikatör, 288; insanda koku duyusu, 149, 156; kuantum tünelleme, 232, 241–2; Lamarkçı kuram, 218, 219, 227; nedenler, 232–3, 242; neo-Darwinist kuram, 227, 228, 235; oluşumu, 227; oranlar, 57, 215, 227, 232, 234, 238, 242; rastgele süreç, 227, 228, 235; sirkes-inekleri, 181, 226–7; sorunlar, 215–6; Schrödinger'in görüşü, 221, 229; totomerizasyon, 228–9, 230, *230*, 231; yoluyla adaptasyon, 221

NADH, 89, 99, 138
NADPH, 131, 138
nanomakineler, 63
nanoteknoloji, 80
Nature, 19, 185, 186, 202, 235, 237, 317
Nature Neuroscience, 171
Naturwissenschaften, Die, 53
Nazi ideolojisi, 53–4
nedensellik zinciri, 256, 257, 263-4
neo-Darwinist sentez, 227
Newton, Isaac, 10, 31, 49, 107, 347
Newton yasaları, 141, 308–9
New York Times, 108, 126, 302
Nietzsche, Friedrich, 142, 149
Nishimura, Mitsuo, 92
nöral ağ, 263
nöron, 258–9, *260*, 263
nörotransmitterler, 258, *260*, 261–2, 281
nötronlar, 11–13, 100

odotop kuramı, 164–5
oksidasyon, 88, 137
Olaya-Castro, Alexandra, 317
Oparin, Alexander, 288
Oparin–Haldane hipotezi, 288–9, 290
organeller, 38
organikçiler, 52

ölçüm: bakteriyel mutasyon, 238; çift yarık deneyi, 117–23; DNA kodunun okunması, 234; dolanıklığa etkileri, 16–17, 22, 120, 198–9; Heisenberg'in çalışması, 48, 233; kazara, 23; kuantum, 124–5, 233–4, 237–41; kuantum dünyasına etkileri, 17–18, 22–3, 120, 315
ölümlülük, 30, 42
ön-hücreler, 336–8, 340–4
özel çift, 323

palyaço balığı, *bkz* anemon balığı
panspermia teorisi, 288
"paranormal fenomenler", 16, 185, 193, 280–1
Pasteur, Louis, 38, 68
Patel, Apoorva D., 306
Pauli Dışlama İlkesi, 195
Pearce, Mick, 335
Penrose, Roger, 265, 271, 272–5, 280
Penrose–Hameroff bilinç kuramı,

274–5, 277
peptid bağı, 68–9, 76–9, 83, *83*, 85
Phillips, Peregrine, 72, 86
pirinç, 333
Planck, Max, 4, 45
Platon, 29
Plenio, Martin, 314, 317
polarizasyon, 16, 17, 22
porinler, 128
Potrykus, Ingo, 333
Proceedings of the National Academy of Science, 173
proteazlar, 72
protonlar: DNA yapısı, *217*, 220–1; fotosentez, 137–8; hidrojen atomları, 10, 11–12; ön-enzim, 290–302; süperpozisyon, 11–13; totomerik pozisyon, 228, 229–31, *230*, *231*, 232, 238–40, 242–3, *244*, 245; tünelleme, 95, 97–9, 101–2, 167, 240, 241–4, 302, 304, 305, 325, 342, 345
protoplazma, 38, 52
pusula, dolanıklık mekanizması, 16, 18–19, 23, 59, 191, 192, 345; ışığın rolü, 202–3; kanatlı, 184–93; manyetik duyu, 4–6, 14, 184–7, 202; manyetit sorusu, 187; radikal çift tepkimesi, 202, 206-7; Schulten'in çalışması, 190–2; Wiltschko'ların çalışması, 188–92
pusula, eğim, 6, 14, 182, 188–9
pusula, kimyasal, 4, 187, 203, 205–6
pusula, konvansiyonel, 205
pusula, kuantum, 203–8
pusula, radikal çifti, 206, 207
pusula, güneş, 180, 182

radikal çiftler, 15, 19, 192, 201–7
radyasyon: elektromanyetik, 10, 45; klasik kuram, 45; kuantum kuramı, 4, 45, 48; mutasyonlar, 226, 227, 233
radyoaktif bozunma, 95, 315
Raman, Chandrasekhara Venkata, 161
Raman spektrumu, 161–2
Reaumur, René Antoine Ferchault de, 67
rennet, 65, 66, 67, 71–2
Reppert, Steven, 182–3, 204
ribozimler, 295, 296, 298, 302, 336, 338
Ritz, Thorsten, 18–19, *19*, 203–6
RNA, 293–301; bazlar, 296–7, 298; DNA'nın okunması, 234, 295; dünyası hipotezi, 295–6; polimeraz, 220; ribozomlar, 337; yaşamın kökeni sorunu, 295–8
Rosing, Minik, 286
RuBisCO, 138
ruh kavramı, 29–30, 37, 264
Ruska, Ernst, 9
Rutherford, Ernest, 46

sağlık, 149–50
salınım: atomaltı parçacıklar 47; eksiton, 313, 314, 317, 318, 322; iyon dalgası, 277; kokuda titreşim kuramı, 169; "kuantum vuru", 133, *134*; manyetik alan, 205–7; protein, 317, 325; sirkadiyen saat, 180
sanatçı, buz devri, 252, 253-9, 263, 281
Scholes, Greg, *19*, 136
Schrödinger, Erwin: dalga fonksiyonu, 53n; denklem, 49–50, 267n; dolanıklık üzerine, 197–8; "düzenden doğan düzen" üzerine, 58, 61, 84–5, 141; "düzensizlikten doğan düzen" üzerine, 56, 57–8, 61, 218, 318–9, 327; etkisi, 51; genler üzerine, 58, 214, 218–9,

220, 244; İrlanda'ya uçuş, 54–5; istatistiksel yasalar üzerine, 55, 56, 61; kalıtım üzerine, 55, 58, 214, 218–9, 220; kuantum düzeyinde fenomen olarak yaşam üzerine, 58, 59, 60, 107–8, 274, 309–10; mutasyonlar üzerine, 221, 229; termodinamik üzerine, 55, 309; *What Is Life?*, 54, 58, 59, 221
Schulten, Klaus, 14, 18–19, 23, 190–2, 195–204
Schweitzer, Mary, 64, 65, 66, 79, 332
Science, 65, 185, 193, 291
Scrutton, Nigel, *19*, 101, 102, 325
Scully, Marlan, 322–3, 341
sentetik biyoloji, 43
serbest enerji, 36–7
serbest radikaller, 14, 201, 203–6, 207
Sheldrake, Rupert, 5
Shelley, Mary, 44
Shepherd, Gordon, 164
Shor, Peter, 270
sıcaklık: Antarktika, 209–10, 220; elektron transferi, 91–2, 96, 98; FMO kompleksleri, 136; iyon soğutucusu, 277; kuantum hesaplama, 269–70, 313; uyumsuzluk, 61
sıçanlar, 148, 156
sinapslar, 261
sinirler, 255–6, 259–63, *260*; sinir ateşlenmesi, 27, 279, 281
sinir-kas bileşkesi, 261–2
sirkadiyen saat, 180-1, 203
sistemler biyolojisi, 42
sitoplazma, 38, 128
siyanobakteri, 293
sirke sinekleri: eğitimli, 172, 183; koku duyusu, 171–2; sirkadiyen duyu, 180, 181, 203; manyetik duyu, 183, 204, 207; mutant oluşturma, 226–7; "T labirent" deneyi, 171
Skoulakis, Efthimios, 171, 173
sodyum iyonları, 258–60, *262*, 276–7
Sokrates, 29
solunum, 88–92, 138–9, 342
solunum zinciri, 90, 94, 96, 137, 311, 333
somonbalığı, 3, 146, 148
spin, 12–13, 14, 193–200
Staerk, Hubert, 191
Stoneham, Marshall, 174
su içinde yağ, 337
Summhammer, Johann, 277
Sutton, Walter, 40
süperpozisyon: adaptif mutasyonlar, 238–40; biyolojide, 20, 24; çift yarık deneyi, 109, 122, 124, 315; DNA proton tünelleme, 244; fenomeni, 11–14; ilkel kendi kendini kopyalayıcı, 306; kanatlı pusulası, 206, 207; kimyasal pusula, 205, 206; Penrose–Hameroff kuramı, 273, 274; ön-enzim, 303–5; kuantum dolanıklık, 198–200, 201, 204; kuantum ısı motoru, 323; kuantum spin, 193, 198–200; kuantum uyumluluk, 125; kübitler, *266*, 267; radikal çift pusulası, 206, 207
sürdürülebilirlik, 335
sürfaktan, 337
Szent-Gyorgyi, Albert, 91
Szostak, Jack, 338

tarım, 332–3
tarla faresi, 149
taşlık, 67
tat duyusu, 150–1
tat reseptörleri, 150, 151
tavuklar, 205, 207
tekli spin durumu, 195, 198,

199–200, 202
telepati, 5, 16, 21, 280
Teller, Edward, 290
tepkime merkezi: enerji transferi, 131–2, 137, 306, 312; fotosentez etkisi, 322; kuantum ısı motoru, 324, 341;moleküler gürültüden faydalanma, 313, 325; moleküler üretim birimi, 131; -ne giden yol, 131–2, 134, *135*, 306, 324; özel klorofil molekül çifti, 323–4; uyumun korunması, 313; yapay, 340
termodinamik: bilimi, 33–4, 319; canlı hücrelerde, 41; entropi, 36; ilkeleri, 34; Schrödinger'in görüşü, 55, 56, 61, 309; serbest enerji, 36n; yaşamda, 36, 39, *328*, *330*
terpenler, 153
Tetrahymena, 295
tilakoidler, 128
Tinba, 300–1
transkripsiyon, 234, 236
translasyon, 234
triptofan, 204
trityum, 100
totomerizasyon, 228–9
totomerler, 229–31, *230*, *231*
Turin, Luca, 166–9, 170–3, 253
tübülin proteinleri, 273
tünelleme, 93–6, *95*: atomlar, 97; biyolojide, 20, 24, 96–9, 102–4; DNA mutasyon hızları, 241–2, 242–3; elektronlar, 96–7, 98, 102, 167–8, 174, 232, 342; enzim etkinliği, 98, 101, 102, 141, 167, 170, 232, 241, 325, 346; esnek, 167; esnek olmayan, 167–8, 174; kinetik izotop etkisi, 99, 101, 241; ön-enzim, 303–4; ön-kendi kendini kopyalayıcı, 305; protonlar, 97, 98–9, 101, 232, 242, 243, 245, 325, 326, 342; süreci, 10–11, 126, 244;

Urey, Harold, 289–90
Urquhart, Fred ve Norah, 177–9
uyumsuzluk: kuantum dalga özelliği, 315; kuantum davranışın düşmanı, 103; kuantum hesaplama, *269*, 271; ölçüm, 124–5; ; ön-kendi kendini kopyalayıcı, 303–4; radikal çift kuramı, 206; sıcaklık, 61, 277; süreci, 60, 87, 95, 124–5, 308–9; uzak tutulması, 60, 103, 126, 133, 136, 271, 277, 317, 326
"uzaktan hayaletimsi etki" , 16, 122, 194, 198, 208, 273, 308

üç boyutlu yazıcılar, 299
üçlü spin durumu, 195, 199–201, 202
üssel büyüme, 268

Vedral, Vlatko, *19*, 207
Venter, Craig, 43–4, 293, 334, 343
Vikingler 283
Virchow, Rudolf, 37
Vosshall, Leslie, 171, 173
Vostok Antarktika üssü, 210–1
Vostok Gölü, 211–3, 215, 222, 245–6
Voyager görevleri, 25–6, 211

Wallace, Alfred Russel, 223n
Watson, James, 41, 216, 228, 235
What Is Life? (Schrödinger), 54, 58, 59, 222
What Is Life? The Next Fifty Years, 59
Wiltschko, Wolfgang ve Roswitha, 5, 6, 14, 18, 20, 187–9, 202–6
Wöhler, Friedrich, 38
Wright, Robert H., 163–4, 174

yapay yaşam, 43-4

yapraklar, 127–32; hücre duvarı, 128; damarlar, 127
yaşam, 25–9; daha derine inmek, 37–9;denizde seyreden gemi olarak, 326–30, *328*; granit blok olarak, 200–2, 205, 206, 326; itici kuvvet, 319–25; kaos olarak, 35–7; kökeni, 287–92, 305–6; mekanistik yaklaşım, 32–3, 52; moleküler bilardo masası, 33; sentetik, 334–7; yapay, 43–4, 343–4; "yaşamsal kuvvet", 29–31
yaşam teknolojisi, 331–4
yaşamsal etkinlikler, 67
yaşamsal kuvvet, 67, 72, 107
Yeagley, Henry, 185
yerel olmama (nonlocality), 196
yoğunluk fonksiyonel teorisi (YFT), 244
Young, Thomas, 110

zarlar, 196–7
Zenon paradoksu, 315
zihin–beden problemi, 257, 264–5
zombiler, 252
zürafalar, 222, 227